



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**NESPOJITÁ REGULACE S PLC VE VÝROBNÍCH
SYSTÉMECH**

DISCONTINUOUS CONTROL WITH PLC IN PRODUCTION SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Petlach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Jan Petlach**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Marada, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Nespojitá regulace s PLC ve výrobních systémech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat implementací algoritmů nespojité regulace (dvoupolohová, třípolohová, impulzní atd.) do programovatelného automatu pro řízení výrobních systémů. Součástí práce bude vytvoření jednoduché regulované soustavy, např. modelu tepelné soustavy. Na ní bude provedeno praktické ověření navržených algoritmů. Výsledky řízení budou navzájem porovnány.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se s metodami nespojité regulace.
Návrh a realizace modelu jednoduché regulované soustavy.
Implementace vybraných algoritmů pro nespojitou regulaci do PLC.
Porovnání implementovaných algoritmů a jejich zhodnocení.
Zpracování podrobné dokumentace.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

BALÁTEĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-020-2.
ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03007-5.
ŠVARC, Ivan. Automatické řízení. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
VÍTEČKOVÁ, Miluše. Základy automatické regulace. Přepřac. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem sestavení elektronických komponent pro vytvoření regulované soustavy, kde regulovanou veličinou je teplota kovového chladiče. Jako akční prvek byl vybrán Peltierův článek. Následně dokumentuje vytvoření software, který implementuje vybrané algoritmy nespojitě regulace do programovatelného kontroléru.

ABSTRACT

This thesis focuses on composition of electronic components in order to create a regulated system, where regulated value is temperature of metal passive cooler. Action element was chosen to be Peltier's module. Furthermore, the thesis documents development of software, which implements selected discontinuous regulation algorithms into programmable controller.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nespojitá regulace, PLC řídicí systém, programovatelný regulátor, regulace teploty pomocí Peltierova článku.

KEYWORDS

Discontinuous regulation, PLC control system, Programmable controller, Temperature control using Peltier's module.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PETLACH, Jan. *Nespojitá regulace s PLC ve výrobních systémech*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129633>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Tomáš Marada.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval pracovníkům ÚVSSR za poskytnuté vzdělání a tlak na rozvíjení technického myšlení, speciálně pak vedoucímu diplomové práce doktoru Tomáši Maradovi za nasměrování k úspěšnému řešení problematiky.

Dále patří dík Adamu Kláskovi, jehož 3D tiskárnu jsem využil k vytisknutí potřebných plastových dílů ke zkompletování modelu.

V neposlední řadě rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Marady, PhD a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20.5.2021

.....

Jan Petlach

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	REGULACE JAKO TECHNICKÁ DISCIPLÍNA	16
2.1	Regulační obvod jako systém	16
2.2	Proporcionální regulované soustavy	16
2.2.1	Bezkapacitní soustavy	16
2.2.2	Jednkapacitní soustavy	17
2.2.3	Dvoukapacitní soustavy	18
2.3	Vybrané algoritmy nespojité regulace	20
2.3.1	Dvoupolohová regulace	20
2.3.2	Třípolohová regulace	20
2.3.3	Impulzní regulace	20
2.4	Diskrétní regulace	20
3	VYBRANÉ UZLY PLC ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ	22
3.1	Historický kontext	22
3.2	Vstupy a výstupy	22
3.3	Vybrané programovací jazyky	23
3.3.1	Strukturovaný text (ST)	23
3.3.2	Function block diagram (FBD)	23
3.3.3	Ladder diagram (LD)	23
3.3.4	Continuous flow chart (CFC)	23
3.4	Proměnné	24
3.5	Komunikace po sériové lince	25
4	VYBRANÉ UZLY VLASTNÍHO ŘEŠENÍ	26
4.1	Peltierův článek	26
4.2	H-můstek	28
4.3	P regulátor	28
4.4	Odporové měření teploty	29
5	REALIZACE MODELU	31
5.1	Peltierův článek	31
5.2	H-můstek	31
5.3	PLC	32
5.4	Čidla teploty	35
5.5	Zdroje	35
5.6	Chladiče	36
5.7	Ventilátory	38
5.8	MOSFET spínač	39
5.9	Napětový dělič	39
5.10	Panel a zapojení	41

6	IMPLEMENTACE ALGORITMŮ A MĚŘENÍ.....	44
6.1	Obrazovky a proměnné	45
6.2	Vývojový diagram procesu	48
6.3	Křivky ohřevu a chladnutí	49
6.4	Implementace dvoupolohového algoritmu	53
6.5	Implementace třípolohového algoritmu	55
6.6	Implementace kvazispojitého algoritmu s PWM.....	59
6.7	Implementace vlastního algoritmu.....	64
7	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	68
8	ZÁVĚR.....	69
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	70
10	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	73
10.1	Seznam tabulek	73
10.2	Seznam obrázků	73
11	SEZNAM PŘÍLOH	75

1 ÚVOD

Nespojitá regulace je stále hojně využívanou a v mnohém výhodnou metodou řízení. V běžném životě, v různých odvětvích průmyslu i ve výrobě, nalezneme mnohé aplikace, kde logika nespojitého akčního zásahu plní zamýšlenou funkci systému buď optimálně, nebo alespoň dostatečně. Jedná se především o aplikace, kde není kladen důraz na udržování regulované veličiny ve velice úzkých mezích, což ve výrobních systémech často být nemusí. Hladina kapaliny v zásobníku nemusí být v mnoha případech regulována na desetinu milimetru, ale stačí zajistit, že se výška hladiny bude zaručeně pohybovat v určených mezích.

Stejně tak tomu je ve výrobním systému, jehož součástí je zařízení, jež musí ke své správné funkci udržovat jistý uzel v okolí určité teploty. Příkladem může být výrobní buňka na lanka s hliníkovou koncovkou pro automobilový průmysl — bowdeny. Lanko se uchytí a do formičky se vpustí tekutý kov. Ten je předehříván v kotli na určitou teplotu tak, aby byl kov dostatečně tekutý a dobře se na ocelové lanko vytvaroval a přilnul. V tomto případě je pásmo přípustných teplot dostatečně velké na to, aby vhodné řízení tohoto tavicího kotle bylo navrženo tak, že bude implementován algoritmus dvoupolohové regulace.

U takového zařízení se předpokládá nepřetržitý provoz, vyhřeje materiál na požadovanou teplotu a pak ji dlouhodobě udržuje, na tuto funkci bude pak výkon spirály dimenzován. V případě, že by se jednalo o zařízení, které by bylo třeba operativně zapínat podle potřeby, bylo by velmi nešťastné, aby musela obsluha čekat několik hodin, než se kov roztaví a bude možné zařízení uvést do provozu. Pak přichází v úvahu další řídicí algoritmy nespojité regulace, například regulace třípolohová, která může být navržena tak, aby zkrátila dobu náběhu na požadovanou teplotu přidavným topným tělesem.

Tato diplomová práce se zabývá zhotovením fyzického modelu podobného tepelného systému, do jehož řídicí jednotky jsou implementovány různé algoritmy nespojité či kvazispojité regulace. Záměrně je navrhnut tak, abychom mohli průběhy pozorovat v rádech minut, nikoliv hodin.

2 REGULACE JAKO TECHNICKÁ DISCIPLÍNA

2.1 Regulační obvod jako systém

Na problematiku automatického řízení a regulace je třeba se dívat jako na systém [1]. *“Systémem rozumíme obecně soubor prvků, mezi nimiž existují vzájemné vztahy a jako celek má určité vztahy ke svému okolí [1].“*

Systém je charakterizován dvěma vlastnostmi — jeho chováním a jeho strukturou. Chování lze popsat jako závislost mezi podněty (vstupy) a konkrétními odezvami (výstupy). Jedná se tedy o vztahy k okolí, které jsou naprosto zásadní. Vztah k okolí je právě to, co dává řídicím systémům existenční význam [1].

Struktura pak popisuje vnitřní funkčnost daného systému. Touto funkčností se rozumí jak vazby mezi prvky systému, tak i chování jednotlivých prvků. Vazby v tomto smyslu definujeme jako vzájemné působení mezi prvky. Prvky lze pak definovat jako uvažované části objektu. Stojí za to se pozastavit nad vztahem mezi těmito dvěma vlastnostmi. Jak vyplývá z popisů jednotlivých vlastností, konkrétní struktura odpovídá zcela jednoznačně určité chování. Naproti tomu konkrétnímu chování odpovídá třída možných struktur, jelikož je možné, aby různě strukturované systémy vykazovaly stejné chování. Tato třída možných struktur může být různě velká množina, přičemž může být i množina prázdná. Tato situace nastane například ve chvíli, kdy je chování fyzikálně nerealizovatelné. Snaha o sestavení perpetuum mobile prvního druhu by spadala právě do kategorie s prázdnou množinou možných struktur [1].

2.2 Proporcionální regulované soustavy

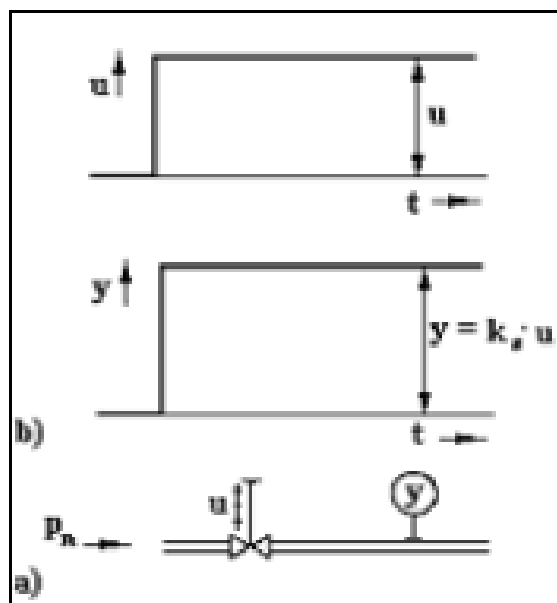
Důležitou vlastností proporcionálních soustav je schopnost po vychýlení z rovnovážného stavu dosáhnout rovnovážného stavu nového i bez zásahu regulátoru [2]. To je dáno nenulovostí koeficientu autoregulace a_0 , který nalezneme v děliteli rovnice (1). [2] V případě, že koeficient autoregulace a_0 je nulový, jedná se o soustavu integrální [2].

$$G_s(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n} \quad (1)$$

2.2.1 Bezkapacitní soustavy

Příkladem bezkapacitní soustavy může být úsek potrubí, kterým protéká voda a je regulován ventilem. Tlak a průtok se v takovém případě projevuje se zanedbatelným zpožděním. Zavedeme koeficient přenosu k_s , který vyjadřuje vztah mezi vstupní veličinou u a regulovanou veličinou y [2].

V rámci uvedeného příkladu je jasné, že jisté poloze ventilu musí odpovídat určitý průtok potrubím, a právě tento přenos koeficient k_s vyjadřuje. Tyto vlastnosti jsou znázorněny na Obr. 1 [2].



Obr. 1 Proporcionální bezkapacitní soustava, a) příklad soustavy, b) přechodová charakteristika [2]

2.2.2 Jednokapacitní soustavy

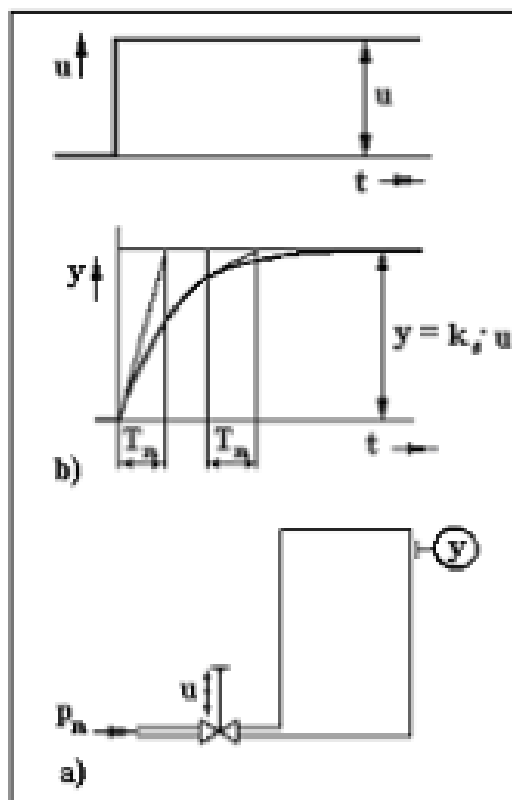
Jednokapacitní soustavy mají kapacitu zadržující energii či látku. Příkladem může být nádrž plněná vzduchem přes ventil, kde rychlost plnění závisí na rozdílu okamžité hodnoty od požadované [2]. Matematicky lze popsat pomocí lineární diferenciální rovnice prvního řádu (2) [2].

$$a_1 y' + a_0 y = u \quad (2)$$

Zavedeme časovou veličinu doba náběhu T_n (3) [2], která odpovídá časovému úseku, za který by veličina dosáhla nového rovnovážného stavu při neměnném růstu od počátečního stavu [2].

$$\frac{a_1}{a_0} = T_n \quad (3)$$

Tomu odpovídá geometrická konstrukce na Obr. 2. V počátečním bodě je tangenta, která právě za dobu náběhu T_n dosáhne rovnovážného stavu. Z rovnice (3) vyplývá, že tato veličina je pro danou soustavu neměnná, je tedy jejím parametrem. Tento poznatek je demonstrován také na Obr. 2, kde vidíme, že doba T_n je konstantní nezávisle na výchozím bodě [2].



Obr. 2 Jednokapacitní proporcionalní soustava, a) příklad soustavy, b) přechodová charakteristika [2]

2.2.3 Dvoukapacitní soustavy

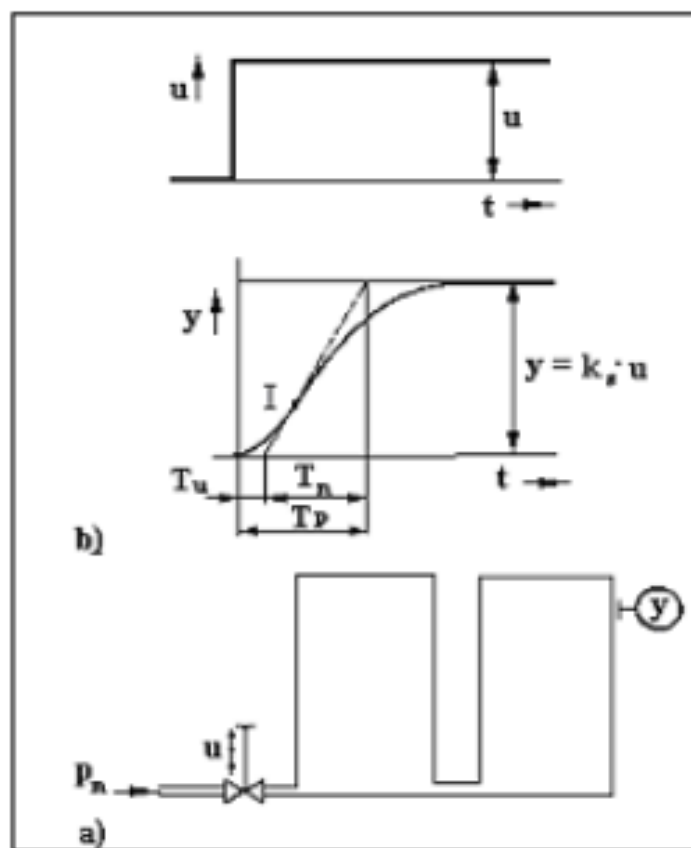
Příkladem dvoukapacitní soustavy může být nádrž s vodou, která je ohřívána pomocí topné spirály. Voda v nádrži i kov, ze kterého je spirála vyrobena, mají tepelnou kapacitu a tím schopnost zadržovat energii [2].

Důležité je určit látku, které teplotu regulujeme. Kdyby byla měřena teplota topné spirály ve stejné soustavě, jednalo by se o soustavu jednokapacitní, jelikož další kapacity na regulaci nemají valný vliv. Naproti tomu, kdybychom regulovali na teplotu pláště nádrže, museli bychom zavést kapacitu třetí, jelikož ocel, ze které je nádrž zkonstruována, má další vlastní kapacitu [2].

Matematicky lze dvoukapacitní soustavu popsat lineární diferenciální rovnicí druhého řádu (4) [2].

$$a_2 y'' + a_1 y' + a_0 y = u \quad (4)$$

Z toho vyplývá průběh měřené veličiny na Obr. 3, kde v rámci rozběhu nacházíme inflexní bod I , kterým proložíme tangentu a jsme schopni určit časovou konstantu doby průtahu T_u a dobu náběhu T_n [2].



Obr. 3 Dvoukapacitní proporcionální soustava, a) příklad soustavy, b) přechodová charakteristika [2]

Jejich součtem dostaneme takzvanou dobu přechodu T_p , platí tedy vztah (5) [2]:

$$T_p = T_u + T_n, \quad (5)$$

Z poměru doby průtahu k době náběhu $\frac{T_u}{T_n}$ lze odhadovat regulovatelnost dle Obr. 4 [2].

	$0 \leq T_u / T_n \leq 0,1$	dobře regulovatelné
2	$0,1 \leq T_u / T_n \leq 0,4$	regulovatelné
3	$0,4 \leq T_u / T_n \leq 1$	obtížně regulovatelné
4	$T_u / T_n \geq 1$	nelze regulovat

Obr. 4 Tabulka regulovatelnosti soustavy [2]

2.3 Vybrané algoritmy nespojité regulace

2.3.1 Dvupolohová regulace

Dvupolohová regulace se vyznačuje tím, že regulační člen nabývá dvou hodnot. Typicky zapnuto/vypnuto, otevřeno/zavřeno. Abychom se vyvarovali přílišného namáhání regulačního zařízení, je vhodné u mnoha aplikací zavést hysterezi neboli pásmo necitlivosti [3].

Toto nežádoucí namáhání by bylo způsobeno příliš častou změnou stavů. Každá změna stavu je realizována mechanismem, který vydrží sice velký, ale konečně velký počet spínacích cyklů. Představme si, že ovládáme topení na základě spínání a rozpínání topného obvodu. Ve stavu “sepnuto” je relé ve chvíli, kdy měřím teplotu, menší, než 20 °C. Pokud se však měřená teplota bude pohybovat velmi blízko této hranice, bude relé neustále spínat a rozepínat. Regulace bude sice účinná, ale relé bude přílišně namáháno bez většího vlivu na kvalitu regulace [3].

Pro nastavení parametrů regulace je důležité, zdali má regulovaná soustava setrvačnost či nikoliv [3].

2.3.2 Třípolohová regulace

Regulační člen u varianty třípolohové regulace nabývá tří hodnot. Běžně se k navození tří stavů používá dvou akčních členů. Poté je stav 1: oba akční členy vypnuty, stav 2: právě jeden akční člen zapnut a stav 3: oba akční členy zapnuty [4].

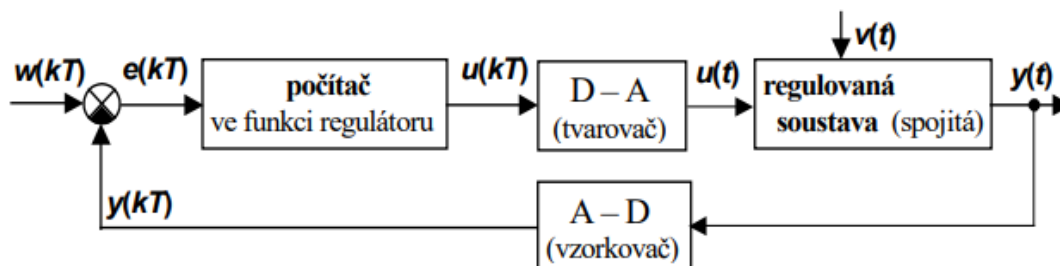
2.3.3 Impulzní regulace

Názvů pro tento typ regulace je více, nejčastěji se však setkáme se zkratkou PWM. Zkratka pochází z prvních písmen anglických slov “Pulse Width Modulation”, volně přeloženo do českého jazyka jako “Pulzně šířková modulace”. Jedná se o rychlé přecházení mezi stavy vypnuto a zapnuto. Poměr mezi těmito stavy se nazývá střída a vyjadřuje hodnotu přenášeného signálu. Tato hodnota se pak dá relativně vyjádřit v procentech, tedy 0 až 100 %. Doba, za kterou dojde k přenosu jedné střídy, se nazývá perioda, která se v průmyslu běžně pohybuje ve zlomcích sekundy. Docela jinak je tomu u řízení budov, kde se perioda řízení běžně pohybuje v řádu desítek vteřin. Frekvence je pak převrácenou hodnotou této periody. Je tedy zřejmé, že je vhodné volit frekvenci v závislosti na dané aplikaci. Tento typ regulace je také někdy označován jako “kvazispojitý”, jelikož benefity spojitého řízení jsou do jisté míry suplovány rychlým přechodem mezi binárními stavy [5].

2.4 Diskrétní regulace

„Diskrétní regulační obvody jsou takové, v nichž alespoň jeden člen pracuje diskrétně, tj. informaci přijímá nebo vydává, eventuálně obojí, v diskrétních časových okamžicích (zpravidla rovnoměrných — ekvidistantních) [6].“

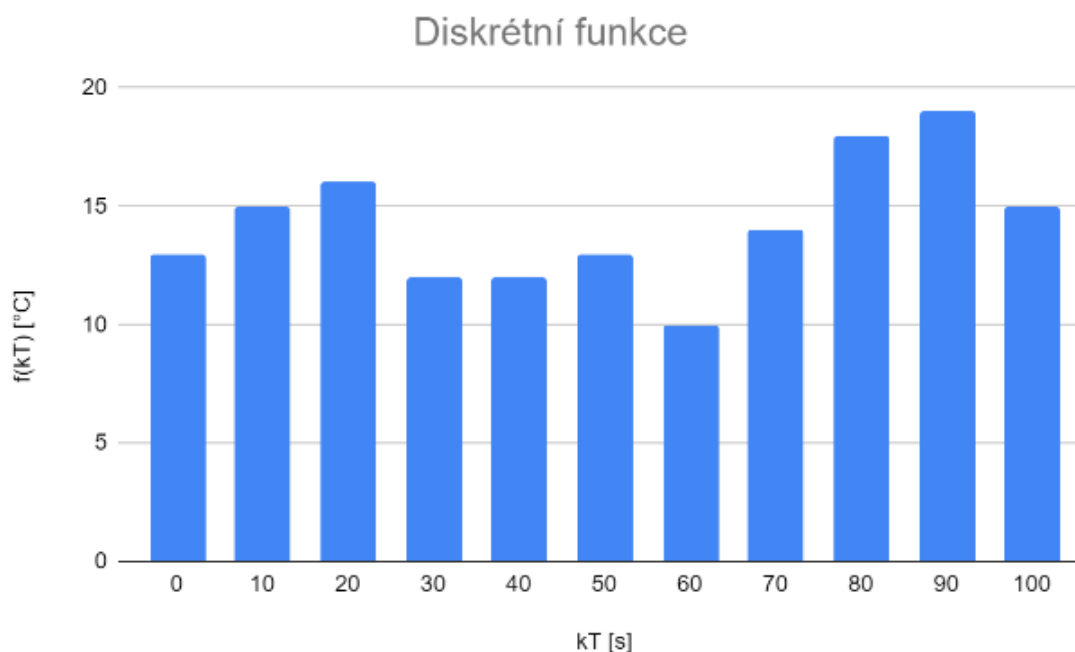
Tématika nespojitých regulačních obvodů je zásadní především z toho důvodu, že odpovídá použití počítače jako regulátoru. Jeho vstupem není spojité napětí, které odpovídá měřené veličině, ale předřazuje se analogově-digitální převodník (Obr. 5 – vzorkovač), takže na vstupu počítače je posloupnost impulzů, což je nespojitá veličina. Počítač pak pracuje tak, že na základě těchto vstupů cyklicky vypočítává hodnoty výstupních veličin, taktéž posloupnost impulzů. Ta je pak převedena digitálně-analogovým převodníkem (Obr. 5 – tvarovač) na spojitou veličinu, která vykonává akční zásah [6].



Obr. 5 Schéma diskrétního obvodu [2]

Je vhodné zavést pojem diskrétní funkce $f(kT)$, která je definována jako posloupnost hodnot ve vzorkovacích okamžicích, které jsou násobky vzorkovací periody T , tedy $k = 0, 1, 2, \dots$. Mimo tyto okamžiky není funkce definována [2].

Na Obr. 6 vidíme příklad takové diskrétní funkce se vzorkovací periodou $T = 10$ s, kde měřená veličina je teplota [vlastní tvorba].



Obr. 6 Diskrétní funkce [vlastní tvorba]

Pro regulaci např. teploty v běžné místnosti je tato perioda v drtivé většině případů dostačující. Výpočet akčního zásahu na základě měřené teploty je dostačující s podobnou relativně velkou periodou v aplikacích, kde se změny v systému dějí pomalu. Tepelné systémy jsou tomu hezkým příkladem. V kontextu výrobních systémů by se mohlo jednat například o udržování teploty tekutého hliníku v kotli, který se následně nalije do formy na konci lanka, čímž se vyrobí bowden do automobilu. Tam také není třeba kontrolovat teplotu každou setinu vteřiny, jelikož chlazení i ohřev kovu v takovéto nádobě je dostatečně pomalý děj [2].

Naproti tomu v aplikacích, kde je třeba uzel systému například polohovat, je třeba vyhodnocovat veličiny v periodě odpovídající zlomku sekundy. Těmto rozdílům musí být PLC uzpůsobeno výpočetním výkonem i provedením vstupů [2].

3 VYBRANÉ UZLY PLC ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ

Zkratka PLC stojí za Programmable Logic Controller, tedy programovatelný logický kontrolér (ovladač – řídicí systém) [6]. „*Logické řízení je cílená činnost, při níž se logickým obvodem zpracovávají informace o řízeném procesu a podle nich ovládají příslušná zařízení tak, aby se dosáhlo předepsaného cíle. Logickým obvodem je fyzikální systém, který lze charakterizovat logickými prvky propojenými mezi sebou logickými (dvouhodnotovými) veličinami* [6].“

Tyto dvouhodnotové 0/1 veličiny nejčastěji reprezentujeme jako: Ne/Ano, False/True, Low/High, Vypnuto/Zapnuto [6].

Pojem PLC již dnes této definici zcela neodpovídá. V mnoha případech by bylo vhodnější použít pojem PAC (Programmable Automation Controller), který lépe vystihuje funkcionalitu a prvky vycházející z PC platformy [6]. V praxi se však s pojmem PAC setkáme spíše výjimečně, jelikož pojem PLC je silně zažitý pro tento typ elektroniky.

3.1 Historický kontext

Vznik PLC se datuje ke konci šedesátých let minulého století a impulsem ke vzniku takového zařízení byly požadavky amerického technologického giganta General Motors. Předchůdcem PLC bylo řízení pomocí relé a reléové logiky. Inovace málokdy přichází sama od sebe, většinou jí předchází touha vyhnout se těžkostem s technologií stávající [7].

Pomocí relé byli technici své doby schopni automatizovat a řídit vysoce komplexní procesy, naráželi však na problémy, díky kterým byla velká motivace po technologii nové. Tato průmyslová relé byla často velmi rozměrná zařízení a někdy bylo třeba použití více takových relé k řízení pouze jednoho systému. Navíc porucha na jednom z relé většinou vyřadila celý systém z provozu, kdy nalezení vadného kontaktu či jiné poruchy trvalo nepřípustně dlouho. Především však trpěla typickým problémem tvrdé automatizace, tedy nutností velkého zásahu do řídicího systému i při malé změně v řídicí logice [7].

3.2 Vstupy a výstupy

Rozlišujeme dva základní typy I/O, a to digitální a analogové. Digitální I/O jsou schopny rozlišit pouze dvě hodnoty, tedy 0/1, sepnuto/rozepnuto. Naproti tomu I/O analogové dokážou rozlišit hodnoty na dané škále s daným rozlišením [8].

Digitální vstupy (DI) doručují do systému signály ze senzorů, které při překonání určité hranice začnou vykazovat logickou 1, například senzor hladiny, který je umístěn v určité úrovni. Nejsme schopni určit, jak vysoko hladina je, ale stačí nám v této hypotetické aplikaci vědět, zdali voda úrovně umístění senzoru dosahuje, či nikoliv. Digitálním vstupem může být také tlačítko, přepínač, koncový senzor nebo čidlo zaplavení [8].

Speciální podkategorií je vstup tzv. čítačový, který musí být schopen rozlišovat pulzy o vysoké frekvenci. Příkladem čítačového vstupu může být průtokoměr, kde se průtok zaznamenává právě četností pulzů, tedy logických 1 v rychlém sledu [8].

Digitální výstupy (DO) a jejich použití také závisí na jejich konstrukci, jaký proud jsou schopny spínat, což souvisí, jestli je výstup konstruován jako reléový. Běžnou hodnotou této logické 1 bývá stejnosměrné napětí 24 V (DC) [8].

Analogové vstupy (AI) doručují do systému signály ze senzorů, které jsou škálovány dle rozlišení vstupu. Vstupující číselná hodnota je pak přepočítána na hodnotu reálnou na základě znalosti typu senzoru. Takovýmto vstupem může být například odporové čidlo teploty [8].

Analogové výstupy (AO) nám umožňují nastavit elektrickou veličinu na hodnotu programátorova výběru v rámci vymezeného intervalu. Běžnou hodnotou je například napětový výstup 0-10 V [8].

3.3 Vybrané programovací jazyky

Tato podkapitola nabízí krátké pojednání o způsobech programování, které jsou používány v tomto typu elektroniky.

3.3.1 Strukturovaný text (ST)

Strukturovaný text je mocný nástroj s kořeny v jazycích jako je Pascal a C. Jeho stavební kameny jsou k dohledání v normě **IEC EN 61131-3**. IEC je zkratka pro International Electrotechnical Commission. Tato norma definuje datové typy, což napomáhá prevenci chyb při programování. Pomocí tohoto jazyka je možné vytvářet různě složité programové konstrukce a také je používán pro programování funkčních bloků [9]. Obzvláště spolupracuje-li na projektu více autorů, je třeba se držet jednotného stylu psaní. Případně strukturovaný text organizovat přehledně a důkladně doplňovat o komentáře. Stejněho výsledku můžeme často dosáhnout různými způsoby a může se snadno stát, že sám autor po pár dnech zapomene, jak vlastně konkrétní konstrukci zamýšlel. I banální úprava může být v nepřehledném kódu extrémně náročná na provedení a může být pro programátora výhodnější napsat kód od začátku. Vyplatí se tedy věnovat jisté úsilí organizaci programu a důkladně komentovat. Krátkodobě je to sice jistá práce navíc, ale již mnohokrát se toto úsilí mnohonásobně zúročilo [10].

3.3.2 Function block diagram (FBD)

FBD je grafický jazyk, který vyjadřuje běh programu jako tok signálu mezi vzájemně propojenými funkčními elementy. Každý funkční blok má definované vstupy, na které mohou být přivedeny pouze signály určitých datových typů a výstupy, které generují signál předem daného datového typu [9].

3.3.3 Ladder diagram (LD)

LD je první grafická metoda programování pro průmyslovou automatizaci, která významně vylepšila produktivitu [9].

Tento jazyk je velmi vhodný pro jednoduché logické operace a je velmi intuitivní i pro lidi, kteří nejsou seznámeni s klasickým počítačovým programováním [6].

3.3.4 Continuous flow chart (CFC)

CFC je programovací metoda velmi podobná FBD. Dala by se označit za nadstavbu mimo rámec **IEC EN 61131-3**. Vyznačuje se větší flexibilitou. V některých programovacích prostředích je dokonce možné do CFC vkládat kusy strukturovaného textu [11].

3.4 Proměnné

Proměnné se běžně dělí na lokální a globální. Globální proměnné mají význam v celém projektu, naproti tomu lokální jsou významné pouze v rámci konkrétního procesu [9, 10].

Datové typy a jazyky pro programování PLC jsou standardizovány podle mezinárodní normy **IEC EN 61131-3** [9, 10].

Data type	Values	Memory space
BOOL	TRUE (1), FALSE (0)	8 bit

Data type	Lower bound	Upper bound	Memory space
BYTE	0	255	8 bit
WORD	0	65535	16 bit
DWORD	0	4294967295	32 bit
LWORD	0	$2^{64}-1$	64 bit
SINT	-128	127	8 bit
USINT	0	255	8 bit
INT	-32768	32767	16 bit
UINT	0	65535	16 bit
DINT	-2147483648	2147483647	32 bit
UDINT	0	4294967295	32 bit
LINT	-2^{63}	$2^{63}-1$	64 bit
ULINT	0	$2^{64}-1$	64 bit

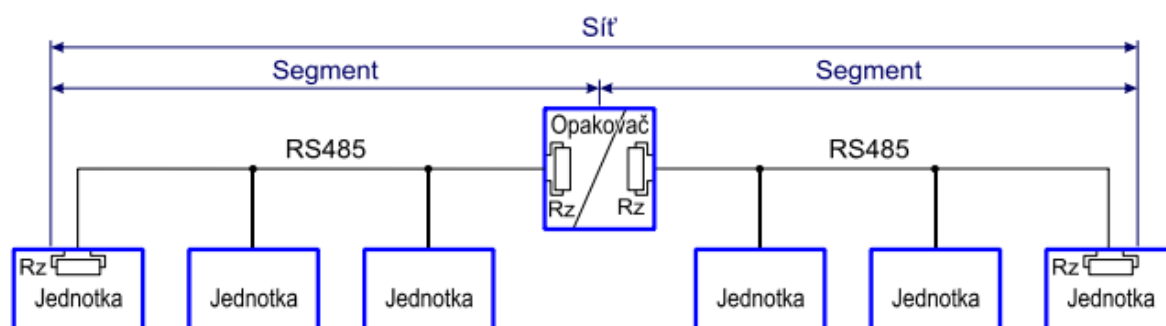
Data type	Lower bound	Upper bound	Memory space
REAL	-3.402823e+38	3.402823e+38	32 bit
LREAL	-1.7976931348623158e+308	1.7976931348623158e+308	64 bit

Obr. 7 Přehled standardních datových typů [9]

3.5 Komunikace po sériové lince

Jedním z průmyslových standardů komunikace je komunikace po sériové lince. Věnovat se budeme kroucené dvojlince RS485. Tato linka je vhodná pro vytváření sítí i pro komunikaci bod-bod na vyšší vzdálenosti [8].

Vzdálenost, na kterou je možné bezproblémově komunikovat, se odvíjí od komunikační rychlosti, která se běžně udává v Baudech [Bd]. Toto číslo udává počet přenesených Baudů za vteřinu. Rychlost je třeba volit tak, aby se komunikace rámců stíhala stabilně a úspěšně provádět. Chceme-li však využívat opravdu vysokých rychlostí, je třeba brát ohled na fyzikální limity linky. Se zvětšováním objemu komunikovaných dat při zvyšujících se rychlostech se zkracuje maximální délka vodičů sériové linky (Obr. 9). Při volbě rychlosti tedy zohledňujeme charakter konkrétní aplikace a požadavek na umístění prvků řídicího systému. Není-li třeba zachovat delší vzdálenosti mezi zařízeními, není důvod nevyužít vyšších rychlostí [8].



Obr. 8 Topologie RS485 [8]

Komunikační rychlost [Bd]	Maximální délka vedení [m]
19 200	1200
38 400	600
57 600	300
115 200	150

Obr. 9 Komunikace po RS485 [8]

Protokolů, které jsou na tuto linku uzpůsobeny, je celá řada. Jedním z nejrozšířenějších je Master/Slave protokol Modbus RTU, který je otevřený, tedy každý výrobce může nahlédnout do jeho struktury a libovolně jej implementovat. Není však výjimkou, že si výrobce vytvoří protokol vlastní [8].

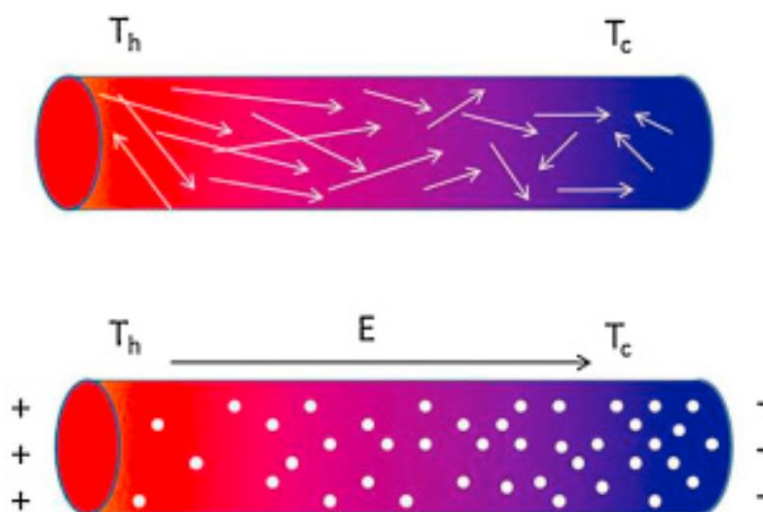
4 VYBRANÉ UZLY VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

V této kapitole jsou úderně popsány vybrané prvky, které souvisí s řešením problematiky a jsou součástí jistého teoretického základu pro návrh modelu. Cílem je osvětlit tyto uzly do té míry, jakou čtenář potřebuje pro porozumění jejich aplikaci v samotném modelu.

4.1 Peltierův článek

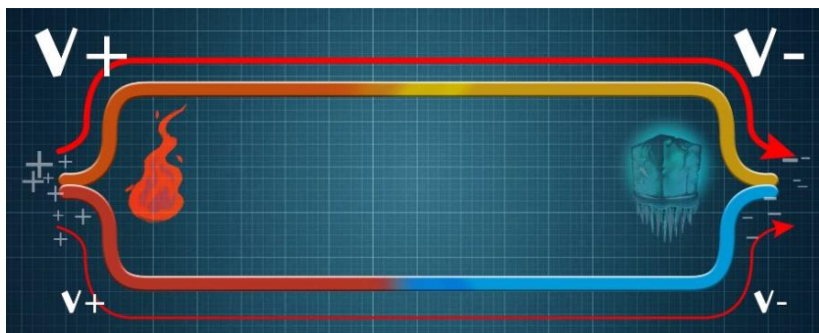
Stěžejním prvkem v našem modelu je Peltierův článek. Tento prvek je prakticky využíván například k chlazení procesorů, vědeckých kamer nebo nápojů v autochladničkách. Toto zařízení využívá Peltierova efektu, který byl odvozen z jevu Seebeckova. Seebeck zjistil, že při zahřívání přechodu dvou různých elektrických vodičů jimi začne procházet proud [12].

Atomy na zahříváné straně vodiče díky vyšší energii kmitají rychleji, excitované elektrony přeskakují k atomům s nižší energií. Tím se stane rozložení nosičů náboje nerovnoměrné, kdy zahříváná strana se stává díky nižší koncentraci elektronů kladnou a chladná strana zápornou. Tím se vytváří rozdíl elektrických potenciálů, tedy elektrické napětí. Toto je ilustrováno na Obr. 10 [12].



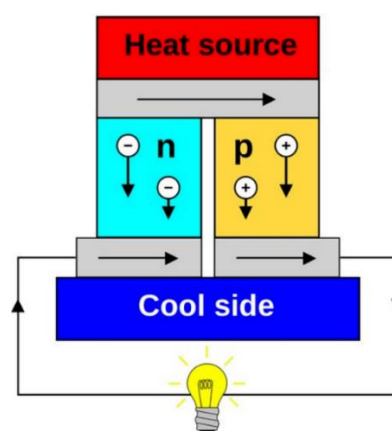
Obr. 10 Napětí na zahříváném vodiči [12]

Zapojíme-li pak dva vodiče s různými fyzikálními vlastnostmi, jak naznačuje Obr. 11, je zřejmé, že díky stejné dodávané energii a různým fyzikálním vlastnostem vodičů vznikne různé napětí v každém z vodičů. Na Obr. 11 vidíme, že napětí na horním vodiči (po směru hodinových ručiček) je větší, než napětí na spodním vodiči (proti směru). Výsledné napětí je pak snadno měřitelné a využitelné [12].



Obr. 11 Napětí ve vodičích [12]

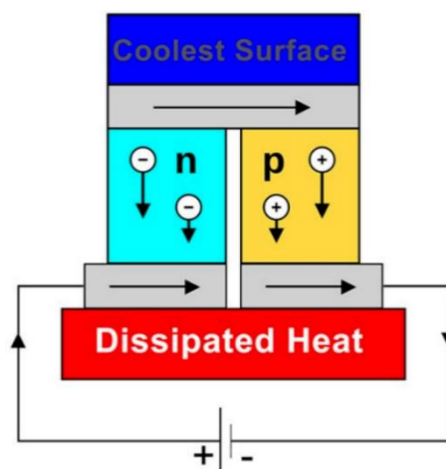
Komerčně dostupné články využívají mnoha přechodů P a N polovodičů vedle sebe. Schéma jednoho takové přechodu i s grafikou funkčnosti je k vidění na Obr. 12 [27].



Obr. 12 Seebeckův efekt [27]

Peltier pak světu přispěl zjištěním, že tento jev funguje i obráceně, tedy při přivedení napětí se jedna strana zahřívá, čímž se druhá ochlazuje (Obr. 13) [27].

Změnou směru průchodu proudu dojde k výměně zahřívané a ochlazované strany [12].

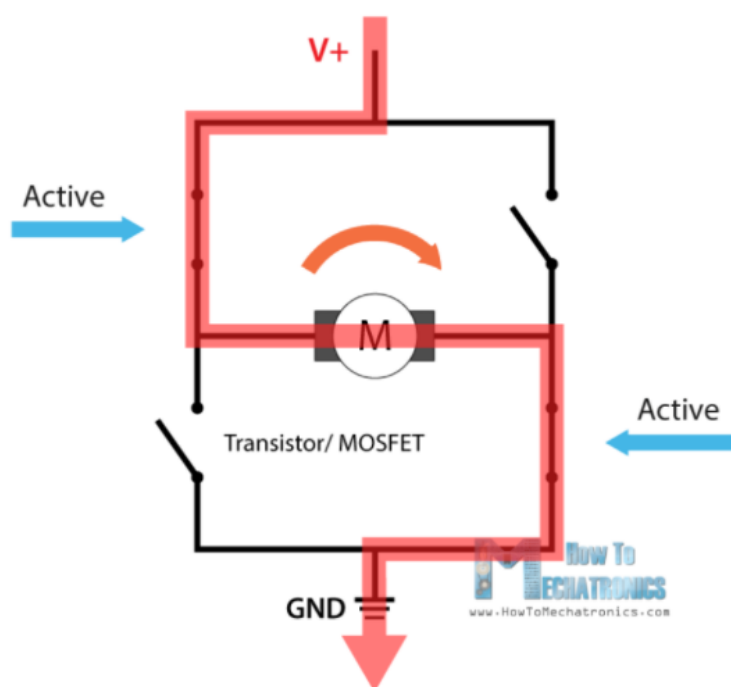


Obr. 13 Peltierův efekt [27]

Důležité je mít na paměti fakt, že je třeba od článku teplo rychle odvádět. Běžně se tak děje upevněním k chladiči. Je vhodné použít také teplovodivou pastu, která zahradí mikroskopické nerovnosti v kovu a ulehčuje tak přenos tepla mezi chladičem a článkem. K poškození článku dochází již řádově po vteřinách, není-li připevněn na kovovém chladiči nebo podobném zařízení plnící obdobnou funkci [13].

4.2 H-můstek

H-můstek je elektronická součástka, která se nejběžněji používá k ovládání DC motoru. Pomocí přivedení signálů na jeho ovládací piny lze měnit směr proudu, který protéká připojeným motorem a tím měnit směr jeho působení. Rychlost je ovládána pomocí PWM signálu s nízkou periodou tak, aby se otáčení jevílo jako dostatečně plynulé [24].



Obr. 14 H-můstek [24]

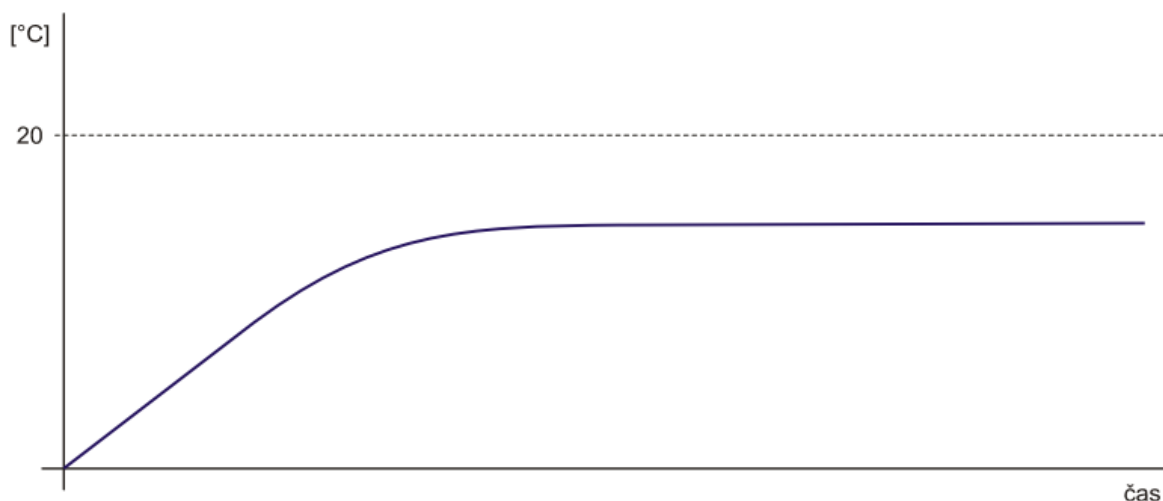
4.3 P regulátor

P regulátor je regulátor, který nabízí pouze proporcionální složku. Do výpočtu akčního zásahu tedy vstupuje pouze rozdíl od žádané teploty x a konstanta zesílení K .

$$y = K \cdot x \quad (6)$$

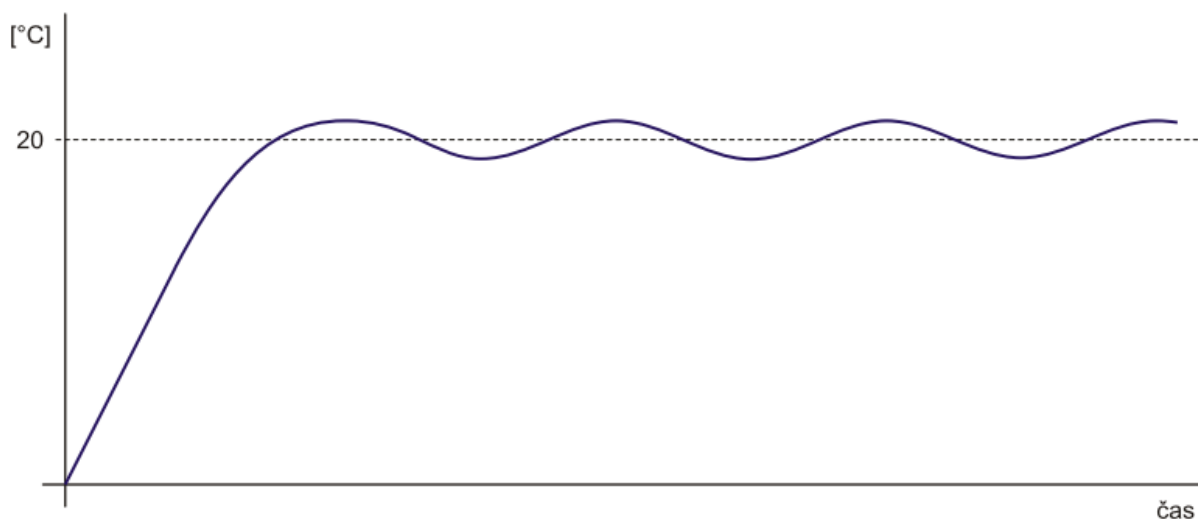
Všeobecně při ladění platí závislost, že čím větší konstanta zesílení K , tím rychlejší a méně stabilní je odezva systému. Při použití samotného P regulátoru ve většině aplikací vzniká trvalá regulační odchylka [8].

V případech, že je konstanta zesílení K příliš nízká, bude trvalá regulační odchylka nepřijatelně velká, viz Obr. 15.



Obr. 15 Nepříjemně nízké zesílení [8]

Naproti tomu příliš vysoké zesílení K vede k nestabilitě a nepotřebným překmitům, jelikož zásah zůstává vysoký i v blízkosti žádané hodnoty, jak je vidno na Obr. 16.

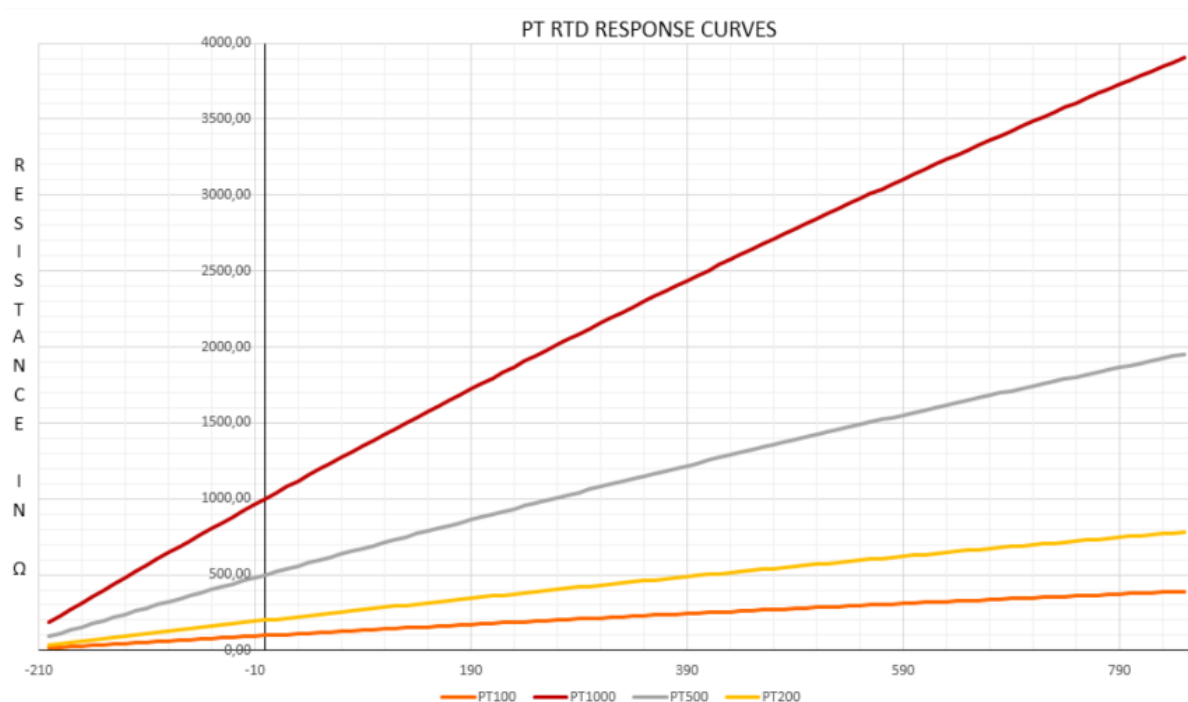


Obr. 16 Příliš vysoké zesílení

4.4 Odporové měření teploty

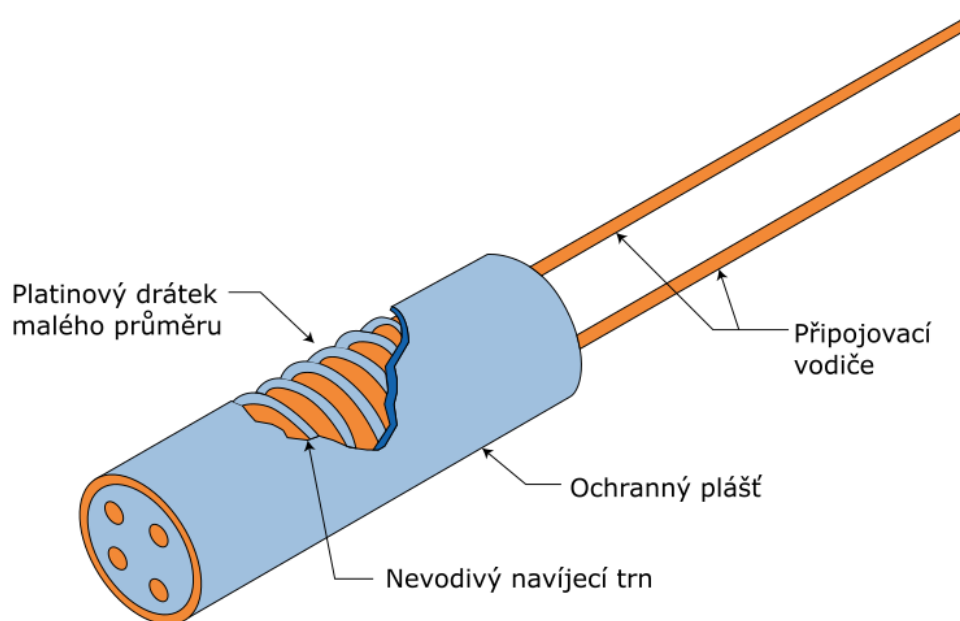
K měření teploty se ustálilo využívání několika typů čidel. Standardem pro průmyslové i jiné automatizační aplikace se stala čidla platinová a niklová [14].

Standardem v platinových čidlech jsou Pt100 a Pt1000. Číslo v označení kovu odpovídá jeho odporu při 0 °C v Ohmech. Změnou teploty kovu se mění jeho odpor, který se pak vyhodnocuje a zpětně se hodnotě odporu přiřazuje teplota. Na Obr. 17 vidíme závislosti odporu na aktuální teplotě pro různé typy platinových čidel. Závislost se na první pohled může zdát lineární, není tomu však tak. Lineární závislosti se pouze blíží. Běžně tento typ čidel dosahuje přesnosti přibližně 0,5 °C [14].



Obr. 17 Odporové křivky Pt

Části běžného odporového platinového čidla jsou k vidění na Obr. 18. Tenký platinový drát navinutý na nevodivém navíjecím trnu, uložen v ochranném pouzdře [16].



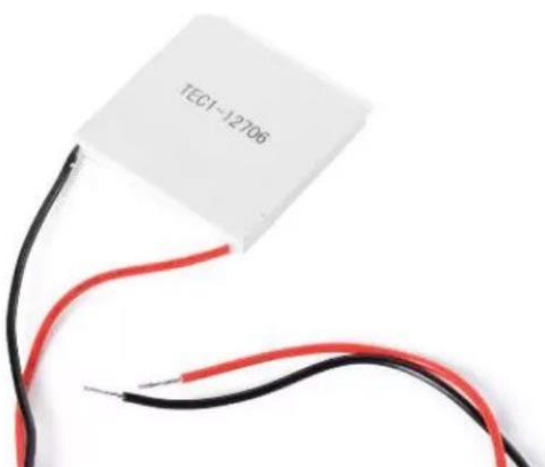
Obr. 18 Pt čidlo [16, upraveno]

5 REALIZACE MODELU

V následující kapitole budou popsány jednotlivé komponenty modelu. V co největší míře bude zachována logika výběru, přestože byly komponenty vybrány v několika iteracích.

5.1 Peltierův článek

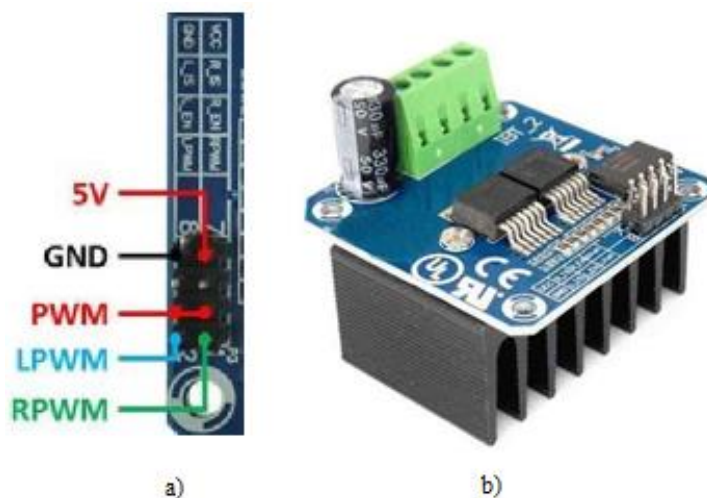
Inženýrským odhadem byl vybrán Peltierův článek TEC-12706 (Obr. 19) společně s požadovanými parametry. Motivací bylo zakoupit co nejvíce komponent od jednoho prodejce a volba padla na tento model, který může být napájen až 15 V při odběru až 4 A. Jednoduchým vynásobením tak známe i maximální výkon článku, tedy 60 W. Optimální se však uvádí napětí 12 V, na které byl obvod dimenzován [17].



Obr. 19 Článek TEC-12706 [17]

5.2 H-můstek

Na základě elektrických parametrů a nabídky prodejce byl vybrán H můstek BTS7960B (Obr. 20a), který je schopen spínat až 43 A.



Obr. 20 H-můstek BTS7960B

Můstek má čtyři svorky, kdy dvě z nich slouží pro napájení a druhé dvě vedou ke spotřebiči. K ovládání logiky slouží osm vstupních pinů, ze kterých je pro nás použitých pouze 6 (Obr. 20a). Tyto svorky a jejich parametry jsou pro další konstrukci velmi důležité, jelikož právě na základě požadavků na ovládání tohoto zásadního prvku byly voleny ostatní, především počet vstupů a výstupů řídicího systému. Jak vidíme na Obr. 20a, k ovládání napájení Peltierova článku potřebujeme na ovládací piny přivést zem (GND), 5 V na napájení logických obvodů (VCC). Dále signál označený jako PWM (L_EN a R_EN). Tento signál je signál ovládající napájení připojeného článku. Tento signál může být, ale nemusí být PWM [17].

Zbývající dva využívané piny jsou LPWM a RPWM [17].

RPWM	HIGH	LOW	LOW	HIGH
LPWM	LOW	HIGH	LOW	HIGH
	CW	CCW	STOP	BURN

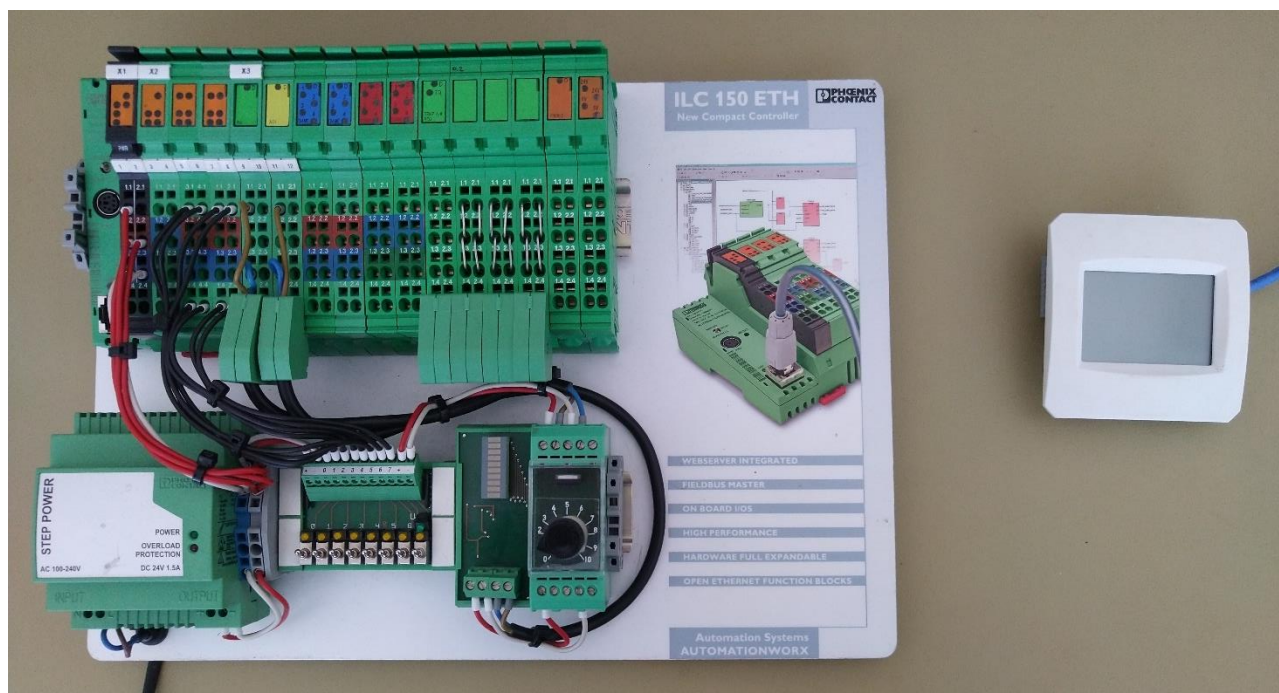
Obr. 21 Tabulka signálů [17]

Tabulka na Obr. 21 ukazuje, jak hodnoty signálů LPWM a RPWM ovlivňují průtok proudu skrz akční člen připojený na svorkách. Na posledním řádku vidíme, jak bude akčním členem protékat proud. Ze čtyř možných variant můžeme dostat výsledek „CW“ (Clockwise – po směru hodinových ručiček), „CCW“ (Counterclockwise – proti směru hodinových ručiček), STOP (proud neprotéká), BURN (dochází k nevratnému poškození můstku). Stav BURN se snažíme předcházet zvláštní kontrolou vodičů a jejich napájení na piny tak, aby se nemohly spojit. Při vývoji SW byl na tento zcela nežádoucí stav také brán zřetel [17].

Na součástce byla provedena jedna úprava, výměna jednoho z odporů za odpor 10 K [Ω] pro piny PWM. Pomocí multimetru bylo zjištěno, který odpor náleží těmto pinům a následně vyměněn pomocí horkého vzduchu a pájky.

5.3 PLC

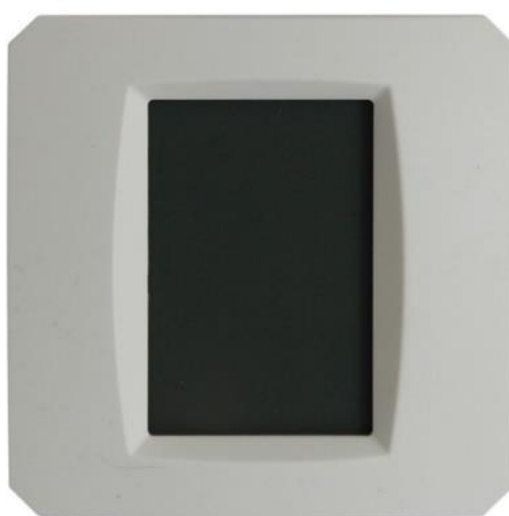
Prvotní návrh systému počítal se zařízením Phoenix Contact ILC 150 ETH (Obr. 22 vlevo). Jedná se o PLC standardní modulární konstrukce, kde se vedle sebe na sběrnici skládají karty dle požadavků konkrétní aplikace. Dá se s úspěchem tvrdit, že toto zařízení je pro naši aplikaci příliš robustní. Nenabízí displej jako uživatelské rozhraní, ovládání pomocí přepínačů by nebylo zdaleka tak intuitivní.



Obr. 22 Srovnání PLC

Jako nejvhodnější varianta pro řízení systému s touto konfigurací vstupů, výstupů a požadavkem na ovládání byl vybrán ovladač AMR-CU70B od výrobce AMiT (Obr. 23) [8].

Na základě poznatků o ovládání H-můstku bylo vybráno právě toto zařízení, které disponuje programovatelným displejem, analogovým výstupem, dvěma digitálními výstupy a dvěma RTD vstupy. Toto zcela přesně vyhovuje požadavkům na řízení navrhnutého tepelného obvodu spínaného můstkem BTS7960B.5.2 Zjevnou výhodou je, že můžeme implementovat řídicí logiku přímo do grafického rozhraní, které navíc disponuje pro tuto aplikaci dostatečným počtem vstupů a výstupů [8].



Obr. 23 AMR-CU70B [8]

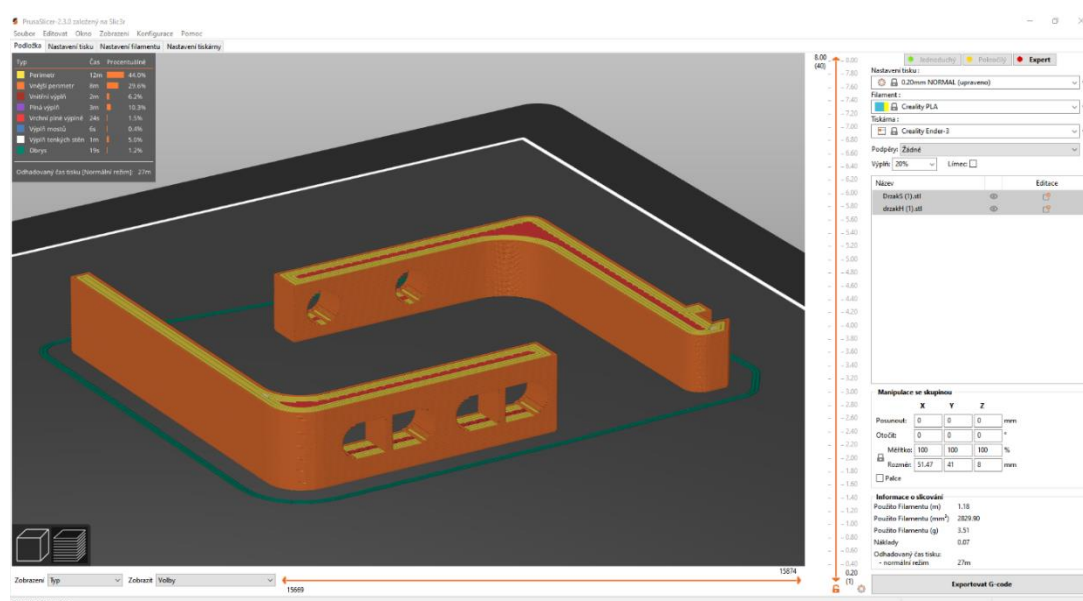
Přestože toto zařízení nevypadá jako běžné implementovatelné PLC, splňuje jeho parametry. Cyklicky vyčítá hodnoty ze vstupů a nastavuje hodnoty na výstupu. Je zřejmé, že pro opravdu průmyslovou aplikaci by bylo vybráno odolnější PLC, které vyhovuje požadovaným IP stupňům krytí pro konkrétní provoz, pro čistě demonstrační účely však vystačí toto kompaktní „all in one“ zařízení [8].

Pro jeho uchycení na panel byl navrhnut speciální držák. Skládá se celkem ze dvou různých komponent (Obr. 24). Celkem se držák skládá ze tří částí, jelikož horní díl se zubem (na obrázku vpravo) je použit dvakrát [vlastní návrh].



Obr. 24 Držák [vlastní návrh]

K vytvoření modelu byl použit program Autodesk Inventor, k vygenerování kódu pro 3D tiskárnu Ender pak software PrusaSlicer. Vzhledem k funkčnosti držáku, která spočívá v tvarovém uchycení za ouška na krytu kontroléru a přitlačení silou od pružné deformace spodním dílem (na obrázku vlevo), byl vybrán pružnější z dostupných plastů – PLA. Díry slouží k přímému uchycení šrouby k panelu (Obr. 38) [vlastní návrh].

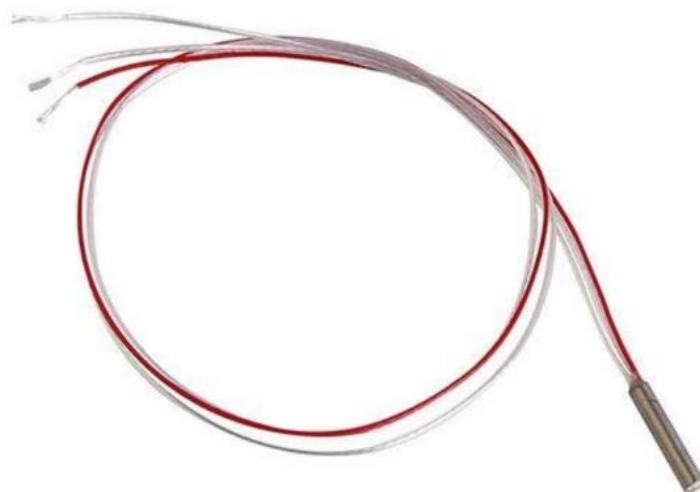


Obr. 25 PrusaSlic

er [vlastní návrh]

5.4 Čidla teploty

K měření teploty bylo použito teplotní čidlo Pt1000. Vybráno bylo na základě kompatibility s programovatelným kontrolérem AMR-CU70B, který má dva vstupy pro odporová čidla a je rozsahově i softwarově vybaven tak, že připojení čidla Pt1000 při správné softwarové konfiguraci nevyžaduje žádný další převodník [17].



Obr. 26 Čidla Pt 1000 [17]

5.5 Zdroje

Vzhledem k tomu, že již máme určeny zásadní prvky modelu, byly vybrány vyhovující zdroje. Pro napájení AMR-CU70B potřebujeme 24 V DC, Peltier vyžaduje 12 V DC. Jako zdroj 24 V byl vybrán adaptér viz Obr. 27, který dodává proud 300 mA [17].



Obr. 27 Síťový adaptér 24 V [17]

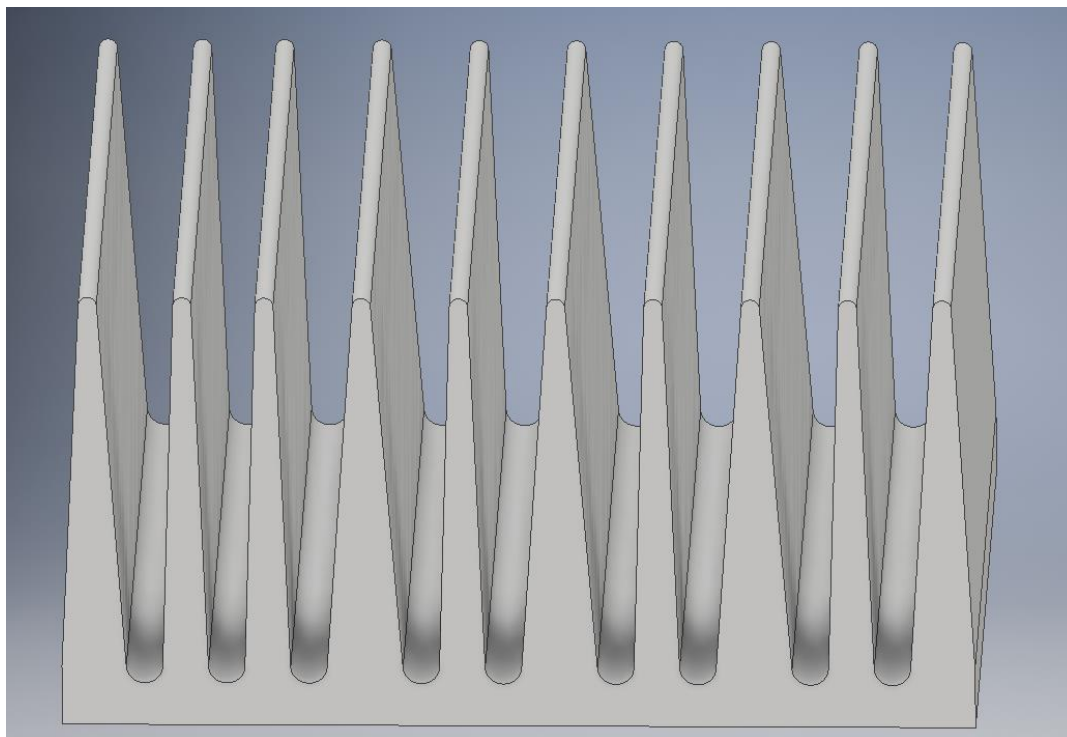
Jako zdroj 12 V DC byl vybrán zdroj WX-DC2412 (Obr. 28), který může být napájen ze sítě (potřebuje 100 až 265 V AC) a je schopen dodat proud až 8 A [17].



Obr. 28 WX-DC2412 [17]

5.6 Chladiče

Od vnějších ploch Peltierova článku je potřeba vzniknuvší teplo účinně odvádět, aby nedošlo k jeho nevratnému poškození. Jako polotovar byly vybrány hliníkové chladiče Al ZH2533 (Obr. 29). Jelikož k výrobku prodejce nedodává dostatečnou dokumentaci, byla součástka naměřena a vymodelována v programu Autodesk Inventor, kde byly modelovány úpravy a způsoby uchycení [vlastní návrh].



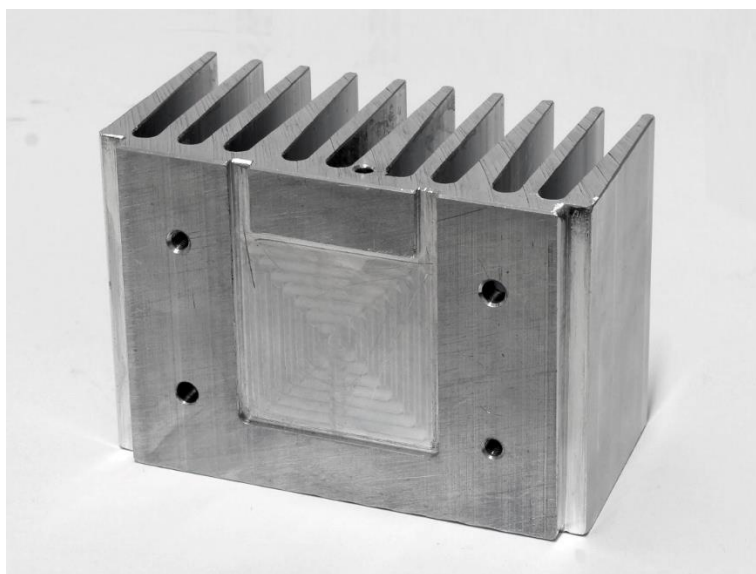
Obr. 29 Al ZH2533 [vlastní model]

Po jedné z iterací výběru komponent, když byl vybrán panel, na kterém budou chladiče připevněny, byly chladiče upraveny tak, aby byly snadno připevnitelné a bezpečně na panelu držely. Pro tento účel byly vyrobeny výřezy na spodních hranách, které jsou vidět na Obr. 30. V širším žeburu na středu každého z chladičů byla vyvrtána neprůchozí díra, která slouží k uložení Čidla Pt 1000 [vlastní návrh].



Obr. 30 Obrobené chladiče [vlastní návrh]

Obrobení chladičů bylo záměrně navrženo tak, aby byly oba protikusy téměř identické. Tím, že budeme měřit teploty na obou stranách, můžeme zaznamenávat a sledovat teplotní gradient, který Peltierův článek vytváří. Jediné, v čem se chladiče liší, je vyřezání závitu ve dvou ze čtyř děr pro spojení na jednom z kusů. Toto je z hlediska tepelného přenosu zcela zanedbatelný rozdíl. Chladiče spojují dva šrouby a dvě závitové tyče, které zároveň upevňují také ventilátory. Detail obrobení čela chladiče je k vidění na Obr. 31 [vlastní návrh].



Obr. 31 Chladič čelo [vlastní návrh]

Na Obr. 32 vidíme vyfrézované zahloubení na míru Peltierovu článku s aplikovanou teplovodivou pastou. Vzhledem k tloušťce Obr. 19 Článek TEC-12706 (4 mm), má každé zahloubení hloubku pouze 1 mm tak, aby se i při nalepení tenké izolační fólie chladiče vzájemně nedotýkaly. Zahloubení pomáhá k ustavení článku v ideální středové poloze, vymezuje oblast, kde je třeba nanést teplovodivou pastu a vytváří drážku pro vedení kabelů [vlastní návrh].



Obr. 32 Chladič izolace [vlastní návrh]

5.7 Ventilátory

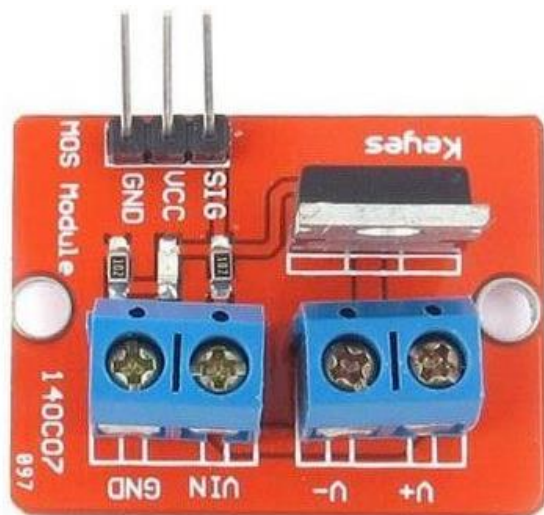
Pro ještě lepší odvod tepla od článku byly na chladiče instalovány ventilátory. Vzhledem k tomu, že máme vybrán zdroj 12 V s dostatečnou rezervou, byly vybrány ventilátory právě na této úrovni stejnosměrného napětí, s odběrem 0,16 A. Tento model (Obr. 33) je schopen dosahovat otáček až 4600 ot/min, což odpovídá hodinové výměně vzduchu o objemu 17,25 kubického metru [17].



Obr. 33 Ventilátory [17]

5.8 MOSFET spínač

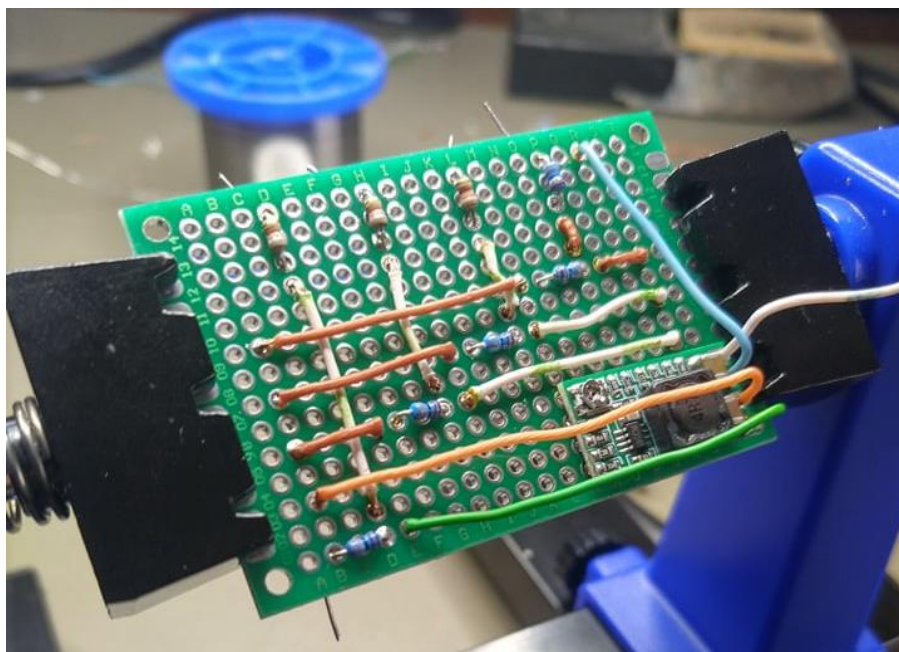
K ovládání ventilátorů byl vybrán Obr. 34 MOSFET IRF520 (Obr. 34). Tento spínač má tři ovládací piny a čtyři svorky. Ventilátory tak díky tomuto spínači ovládáme pomocí přivedení napětí odpovídající HIGH hodnotě na pin SIG. Každý ventilátor má svůj MOSFET spínač, aby mohly ventilátory být aktivní nezávisle na druhém [17].



Obr. 34 MOSFET IRF520 [17]

5.9 Napěťový dělič

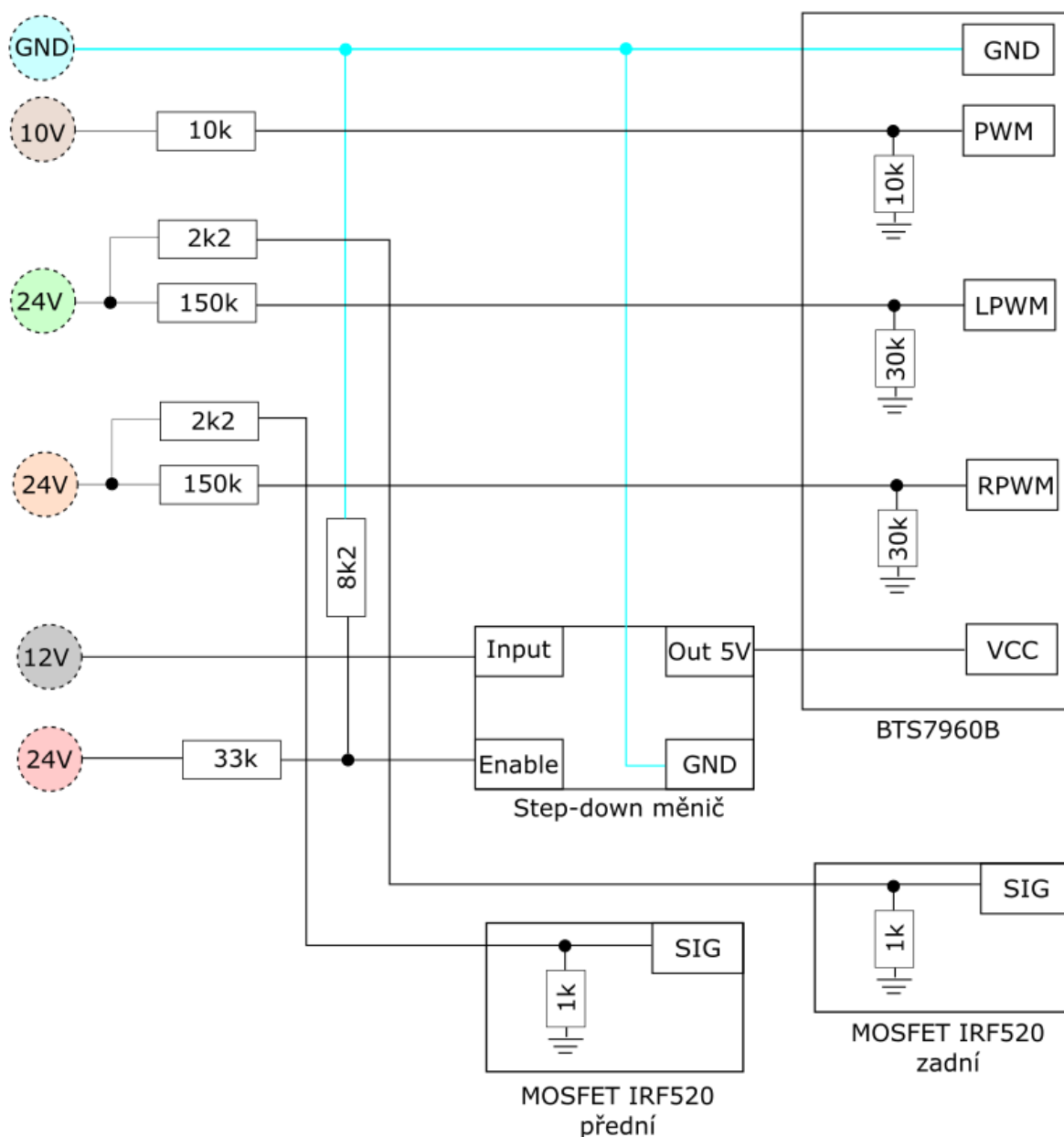
Deska s napěťovým děličem (Obr. 35) je velmi důležitým a pracným prvkem celého



sestavení. Převádí signály tak, aby byly z výstupů AMR-CU70B převedeny na takové hodnoty elektrických veličin, že jsou zpracovatelné H-můstkem BTS7960B a MOSFET spínačem IRF520 [17].

Obr. 35 Deska napěťového děliče [17]

Na Obr. 39 je tento prvek pod označením (4) a je zde zakreslen pouze jako „Black box“, tedy něco do něj vstupuje, něco vystupuje a nerozebíráme, jaké je vnitřní zapojení. Toto zapojení je rozkresleno na Obr. 38.



Obr. 36 Dělič schéma [vlastní návrh]

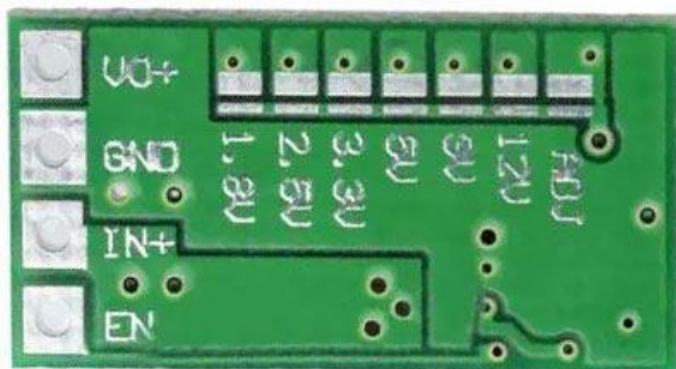
Pro stanovení hodnot připájených odporů byl využit vztah (7) [11]. V_{out} je výsledné napětí na pinu, V_{in} je vstupní napětí (10 V, 12 V nebo 24 V), R_s je odpor na součástce a R_d odpor připájený na desce [11].

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_s}{R_s + R_d} \quad (7)$$

Na vstupních pinech do H můstku BTS7960B RPWM, LPWM a PWM je ideální doručit signál HIGH v rozmezí 3-5 V. S odpory na těle můstku dobře vychází 150 K pro DO 24 V (po dosazení do (7) $R_s = 30\text{ K}$, $R_d = 150\text{ K}$ a $V_{in} = 24\text{ V}$, vychází $V_{out} = 4\text{ V}$). Pro AO byl R_s přepájen za odpor 10 K tak, aby z (7) vyšlo po připájení na desku odpor $R_d = 10\text{ K}$ polovina vstupního napětí, tedy 5 V. Problém byl v tom, že analogový výstup nebyl schopen dodávat dostatečný proud v případě, že $R_s = 30\text{ K}$ a $R_d = 30\text{ K}$, ačkoliv výstupní napětí vycházelo stejně, jako po úpravě. Výstupu by tímto dlouhodobě hrozilo poškození, přistoupilo se tedy k tomuto operativnímu řešení.

Za součástku „Step-down měnič“ na Obr. 36 byl vybrán model M409A (Obr. 37). Ten nabízí více úrovní výstupního napětí, musel tedy být upraven dle návodu výrobce tak, aby výstupní napětí mělo požadované parametry. Tato operace spočívala v přeříznutí vrstvy desky a spájení vybraného spoje [17].

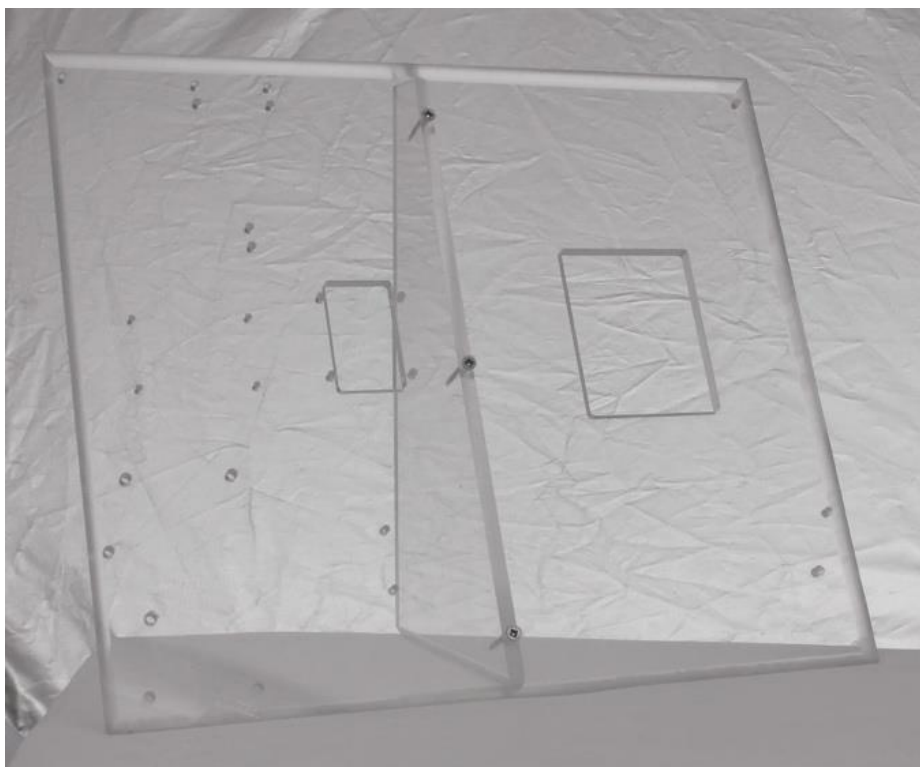
Na tomto obrázku vidíme spodní stranu součástky, kde bylo třeba úpravu provést. Přední strana je k vidění v pravém dolním rohu desky na Obr. 35.



Obr. 37 Step-down měnič [17]

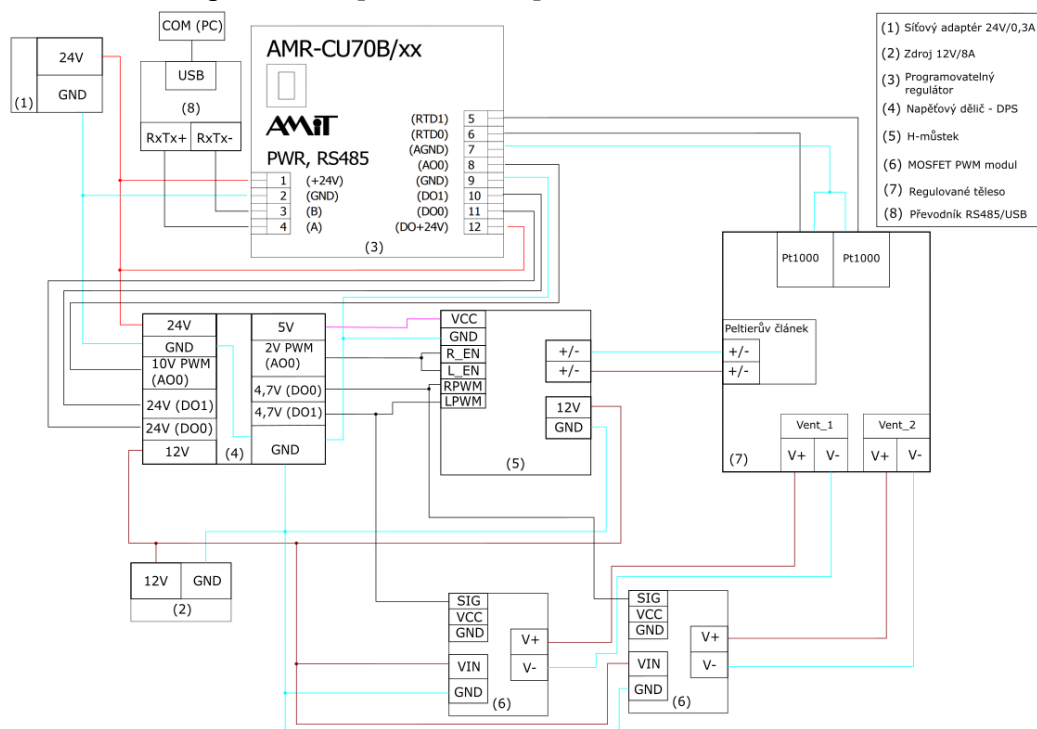
5.10 Panel a zapojení

Aby byl model dobře kompaktní a dobře přenosný, byl zkonstruován panel z plexiskla (Obr. 38). Do čela byly na CNC frézce DOOSAN vyfrézovány otvory na chladiče a díry na upnutí jednotlivých prvků. Materiál by měl být dostatečně tepelně odolný. Trvale zvládá teploty kolem 70 °C, krátkodobě teploty nad 100 °C [18]. Chladiče Peltierova článku navíc čelní desku příliš tepelně zatěžovat nebudou, přestože teplá strana může dosahovat vysokých teplot. Toto je dáno faktem, že z principu funkce tohoto akčního prvku bude sice teplá strana desku zahřívat, zároveň však bude chlazená stranou studenou.



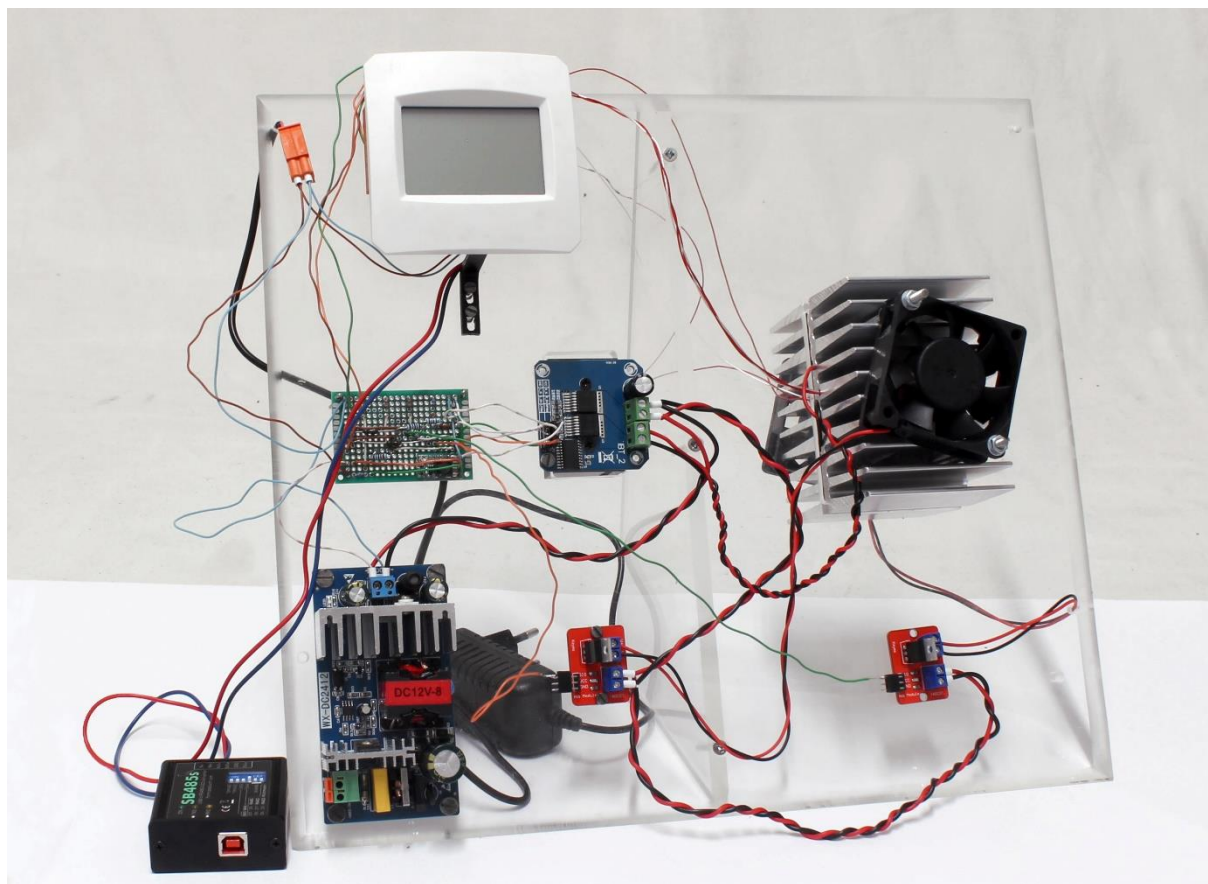
Obr. 38 Panel [vlastní foto]

Na Obr. 39 vidíme realizované zapojení všech komponent. Pro jednodušší orientaci ve schématu byly rozlišeny barvy vodičů tak, že uzemněné vodiče jsou světle modré, napájecí vodiče červenou (24 V), hnědou (12 V) nebo růžovou (5 V). Signálové vodiče jsou značeny barvou černou. Důležité je povšimnout si, že zapojení bylo navrženo tak, aby záměrně spínal pouze ventilátor na „teplé“ straně [vlastní návrh].



Obr. 39 Schéma zapojení [vlastní návrh]

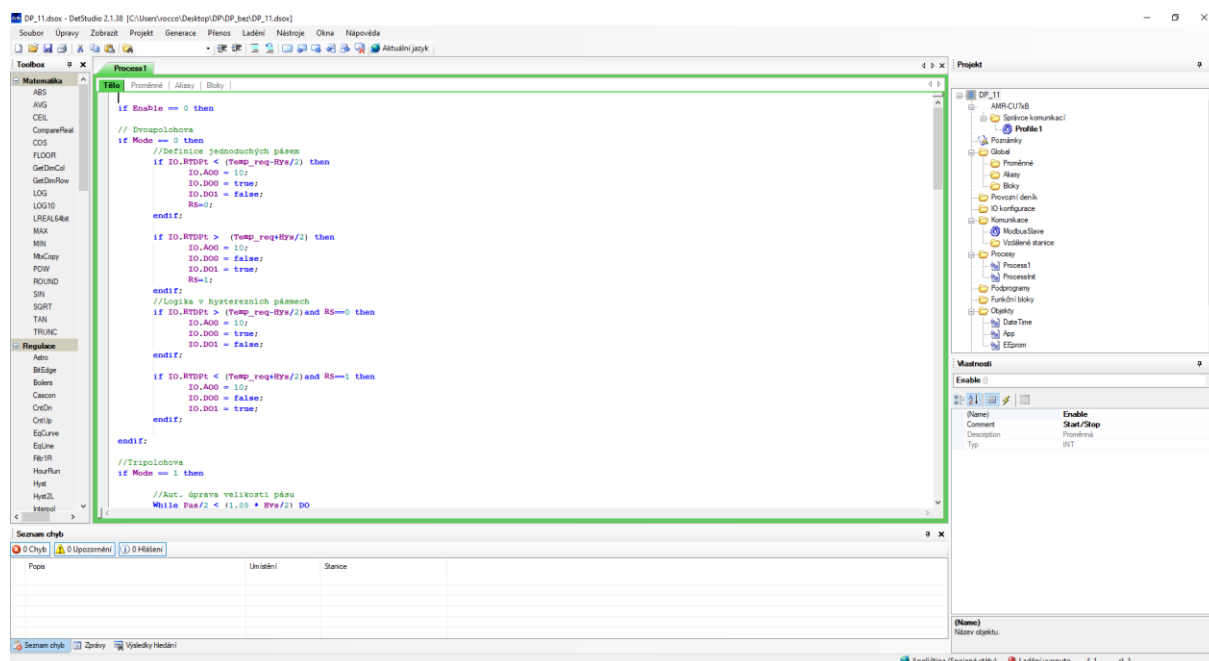
Výsledný model zapojený dle schématu zapojení (Obr. 39) je k vidění na Obr. 40.



Obr. 40 Reálné zapojení [vlastní foto]

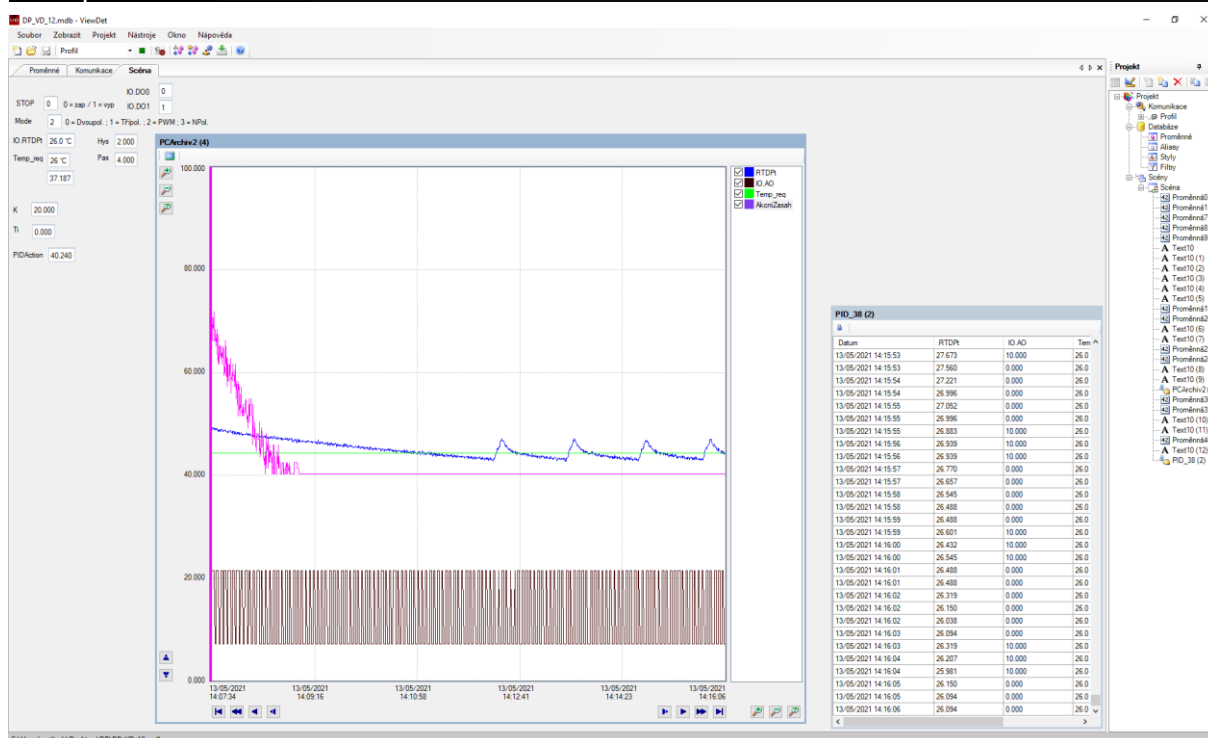
6 IMPLEMENTACE ALGORITMŮ A MĚŘENÍ

Celý systém je řízen regulátorem AMR-CU70B českého výrobce automatizační elektroniky AMiT. Programové vybavení bylo vytvořeno v programovacím prostředí DetStudio. Jednotlivé algoritmy byly vytvořeny pomocí ST (strukturovaný text).



Obr. 41 DetStudio

Vývoj proměnných byl sledován v prostředí ViewDet. Při správném navázání komunikace je možné data nejen sledovat, ale také do nich aktivně zasahovat, jak je vidět na Obr. 42 v levé horní části scény, kde byly vytaženy parametry regulace tak, aby bylo možno přepisovat hodnoty vybraných registrů kontroléru tak, že je možné ovládat regulaci z PC. Jinak by bylo nutné měnit parametry přímo na obrazovce AMR-CU70B. Tento software nabízí možnost exportu archivu dat ve formě .csv souboru. Těto funkce bylo hojně využito, takže data nebyla pouze odečítána z grafu, ale následně zpracována v Excelu.



Obr. 42 ViewDet

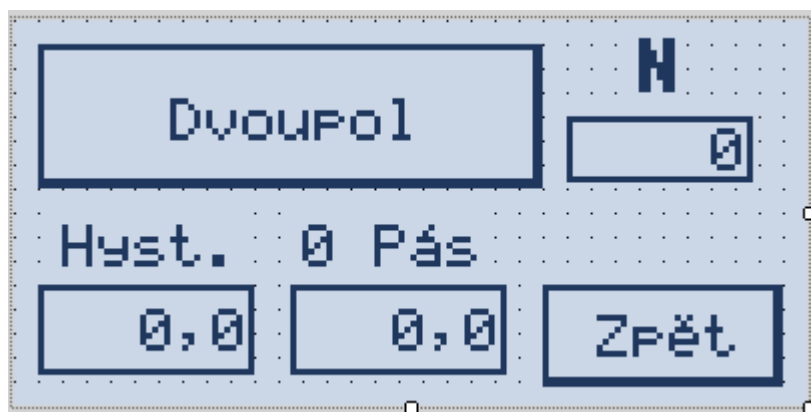
6.1 Obrazovky a proměnné

AMR-CU70B je regulátor s obrazovkou, která je programovatelná, takže si uživatel může rozvržení prvků a obsah sestavit dle libosti a potřeb souvisejících s danou aplikací. Hlavní obrazovka byla navržena, jak je k vidění na Obr. 43, zobrazení žádané hodnoty s možností její přímé editace, zobrazení měřené hodnoty čidlem Pt1000 a prvek, který odkazuje na další obrazovku s nastavením parametrů.



Obr. 43 Hlavní obrazovka

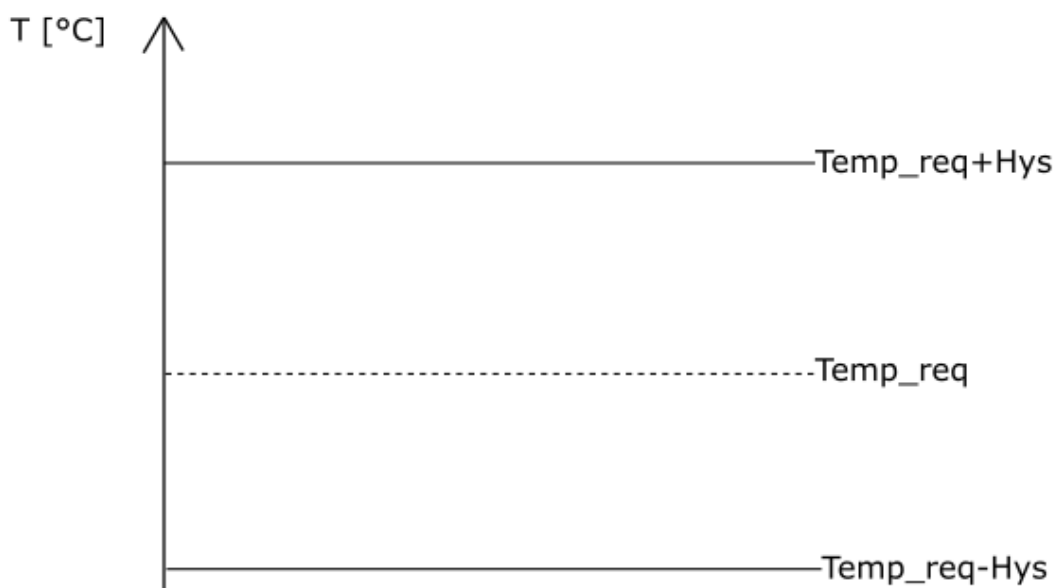
Na obrazovce nastavení (Obr. 44) se nastavují všechny další parametry regulace. Klepnutím na pole s názvem aktuálně aktivního módu se mění hodnota vnitřní proměnné *Mode*, která určuje, která část programu se vykonává, tedy který řídicí algoritmus je aktivní. Dále je možné ručně přenastavit šířku hysterezního pásma pomocí změny proměnné *Hyst* a pole označené jako „0 pás“ přenastavuje hodnotu vnitřní proměnné *Pás*, která slouží k vymezení jednoduchých pásem. Pomocí pomocné proměnné *Pp* se vypočítá parametr *N*, který se využívá k určení počtu poloh ve vlastním algoritmu.



Obr. 44 Obrazovka nastavení

Za jednoduché pásmo považujeme pásmo teplot, při kterých algoritmus vždy vyhodnotí akční zásah stejně. Na Obr. 45 jsou to teploty nad horní hranicí ($\text{Temp_req} + \text{Hys}$) a pod spodní hranicí ($\text{Temp_req} - \text{Hys}$).

Za pásmo hysterezní považujeme pásmo teplot, při kterých algoritmus vyhodnocuje akční zásah v závislosti na tom, ve kterém jednoduchém pásmu naposledy řídicí systém zaznamenal hodnotu. Lidově řečeno, záleží, jestli jsme se do hysterezního pásma dostali „shora“ nebo „zdola“. Na Obr. 45 jsou to teploty mezi ($\text{Temp_req} + \text{Hys}$) a ($\text{Temp_req} - \text{Hys}$).



Obr. 45 Rozlišení pásem

Process1 Hlavní Vyber Global						
Proměnné Aliasy Bloky						
Jméno	Druh	Typ	Řádků	Sloupců	Init	Komentář
Temp_req	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			20	Žádaná teplota
Mode	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			0	Proměnná určující řídicí algoritmus
Hys	VAR_GLOBAL_RETAIN	REAL			2	Pásmo necitlivosti
RS	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			0	Proměnná zaručující hysterezi
Pas	VAR_GLOBAL_RETAIN	REAL			4	Velikost pásu
Enable	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			0	Start/Stop
N	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			1	Počet poloh N-pol regulace
Pp	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			4	N stupňová reg hodnota nastaven na disp
PWMNIN	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			0	Input do PWM při moji regulaci
PWMNOUT	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			0	výstup z pwm moji regulace
PWM0IN	VAR_GLOBAL_RETAIN	REAL				Input do PWM při PID
PWM0OUT	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT			0	Výstup z PWM při PID
PWM3OUT	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT				Výstup z PWM při 3pol
PWM3IN	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT				Input do PWM při 3pol
i	VAR_GLOBAL_RETAIN	INT				Pomocná proměnná pro Npol

Obr. 46 Popis proměnných, proměnné byly vytvořeny jako globální

Peltierův článek byl instalován tak, že směr průchodu proudu, „po směru hodinových ručiček“ topí na přední straně panelu, kde je instalováno také hlavní regulační čidlo *IO.RTDPT*. Jak je zřejmé z tabulky na Obr. 21, je tedy zřejmé, že kombinace *IO.DO0 = true*, *IO.DO1 = false* zajišťuje právě tento směr průchodu proudu.

Chceme-li topit, je třeba nastavit *IO.DO0 = true*, *IO.DO1 = false*, chceme-li chladit, je třeba nastavit *IO.DO0 = false*, *IO.DO1 = true*.

Právě kvůli nežádoucímu stavu, kde jsou oba tyto výstupy *true* byla implementována ochrana proti tomuto stavu (Obr. 47).

```
//BURN ochrana
if IO.DO0==true and IO.DO1==true then
IO.A00=0;
IO.DO0=false;
IO.DO1=false;
endif;
```

Obr. 47 Burn ochrana

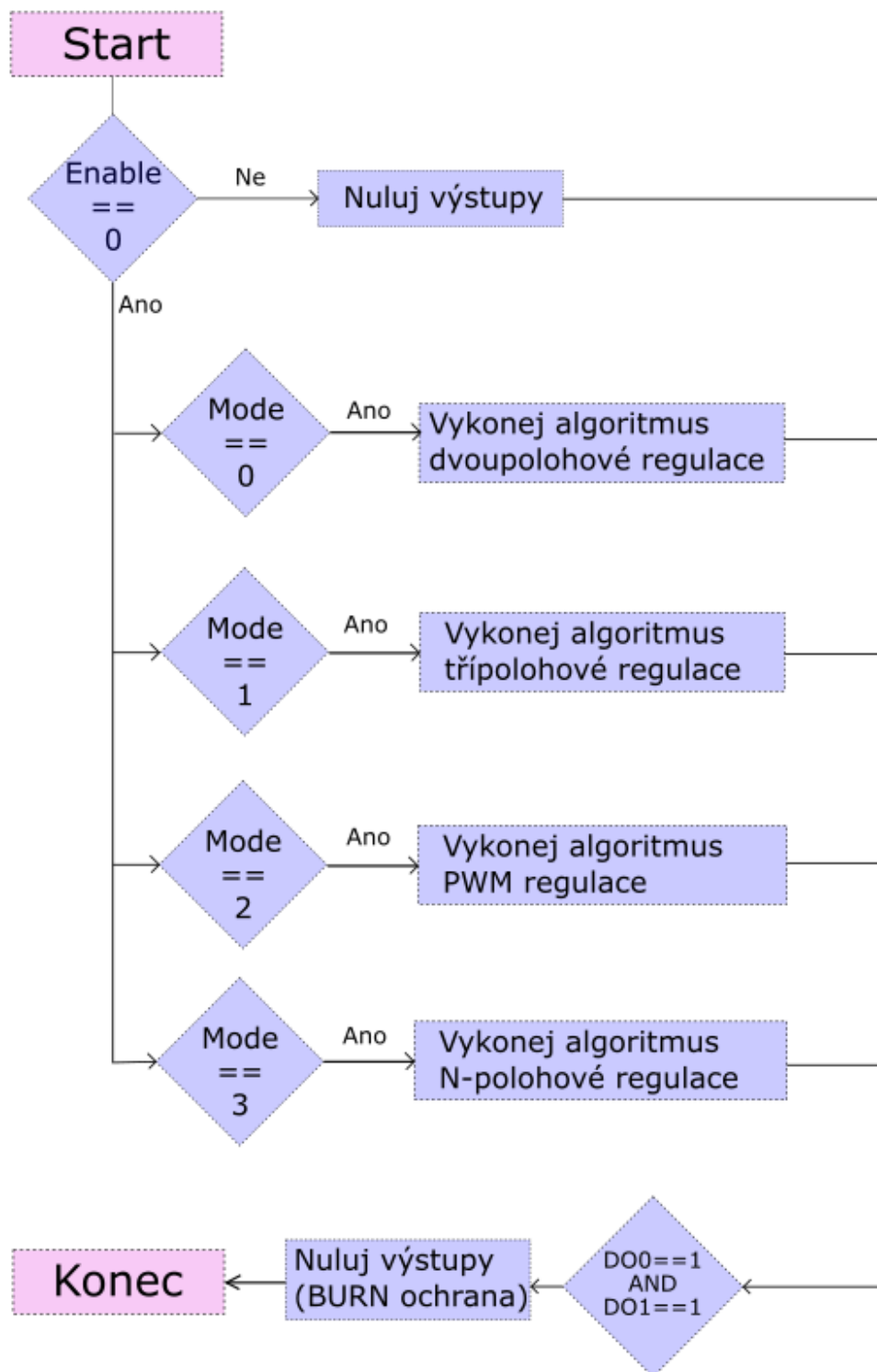
Také bylo přidáno nulování výstupů (Obr. 48) při stisku STOP tlačítka, které je navázané na proměnnou *Enable*. Toto zaručí, že nezůstanou výstupy sepnuty a nemůže se stát, že i po stlačení STOP budou dále aktivní ventilátory, nebo topný článek.

```
//Stop akce
else
IO.A00=0;
IO.DO0=false;
IO.DO1=false;
endif;
```

Obr. 48 Stop akce

6.2 Vývojový diagram procesu

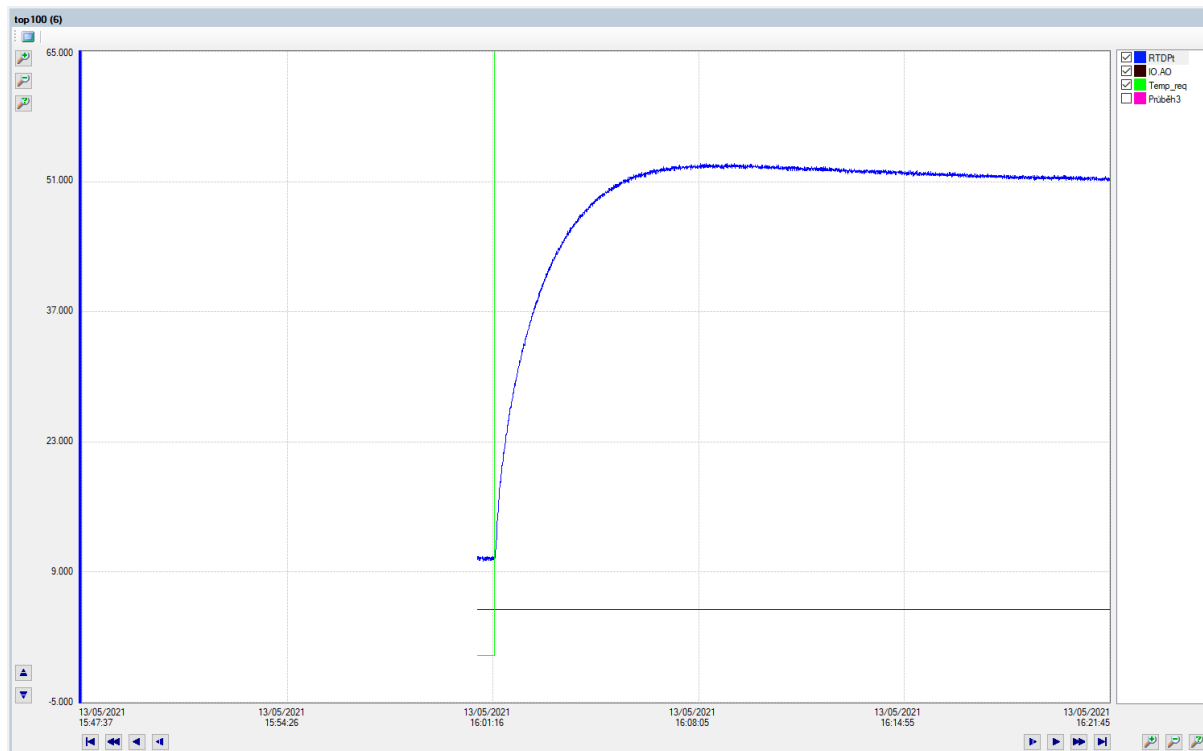
Na Obr. 49 vidíme vývojový diagram procesu, který se vykonává s periodou 200 ms. Jak si můžeme povšimnout, BURN ochrana je řazena tak, aby se vykonala pokaždé. Takto se předchází tomuto stavu, i kdyby se neznalý uživatel pokoušel měnit hodnoty výstupů ručně pomocí funkce ladění v DetStudiu.



Obr. 49 Vývojový diagram

6.3 Křivky ohřevu a chladnutí

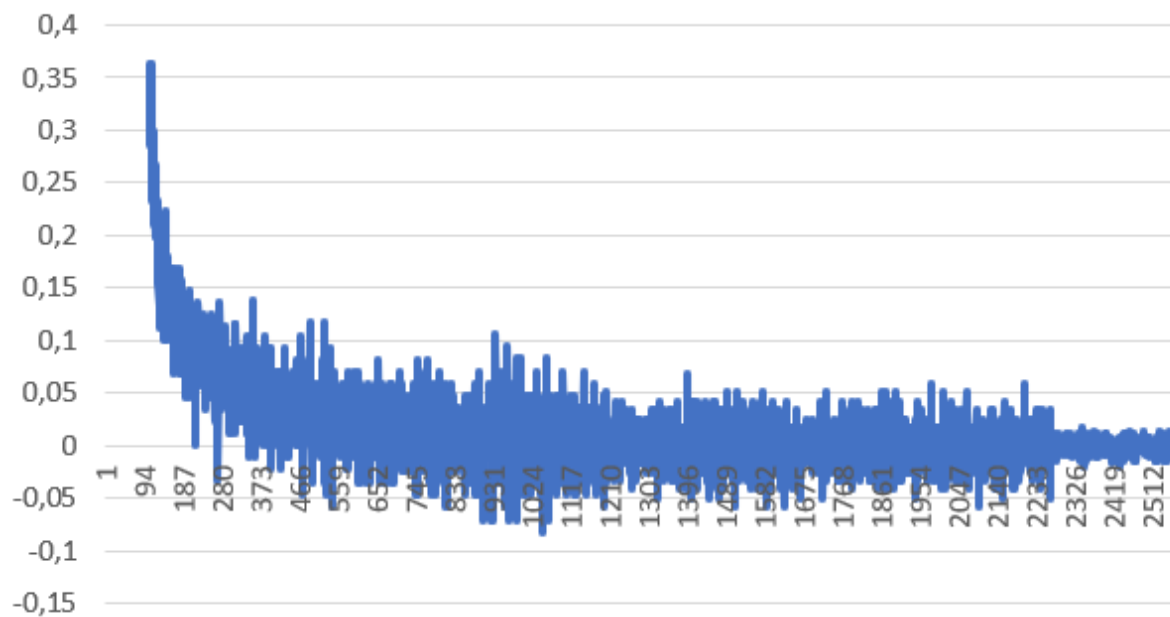
Byly naměřeny křivky ohřevu (Obr. 50) a chladnutí (Obr. 51) v plném rozsahu. Díky těmto měřením jsme zjistili maximální/minimální dosažitelnou teplotu chladiče v místě čidla při dané teplotě prostředí, kterou považujeme za neměnnou.



Obr. 50 Křivka ohřevu 100

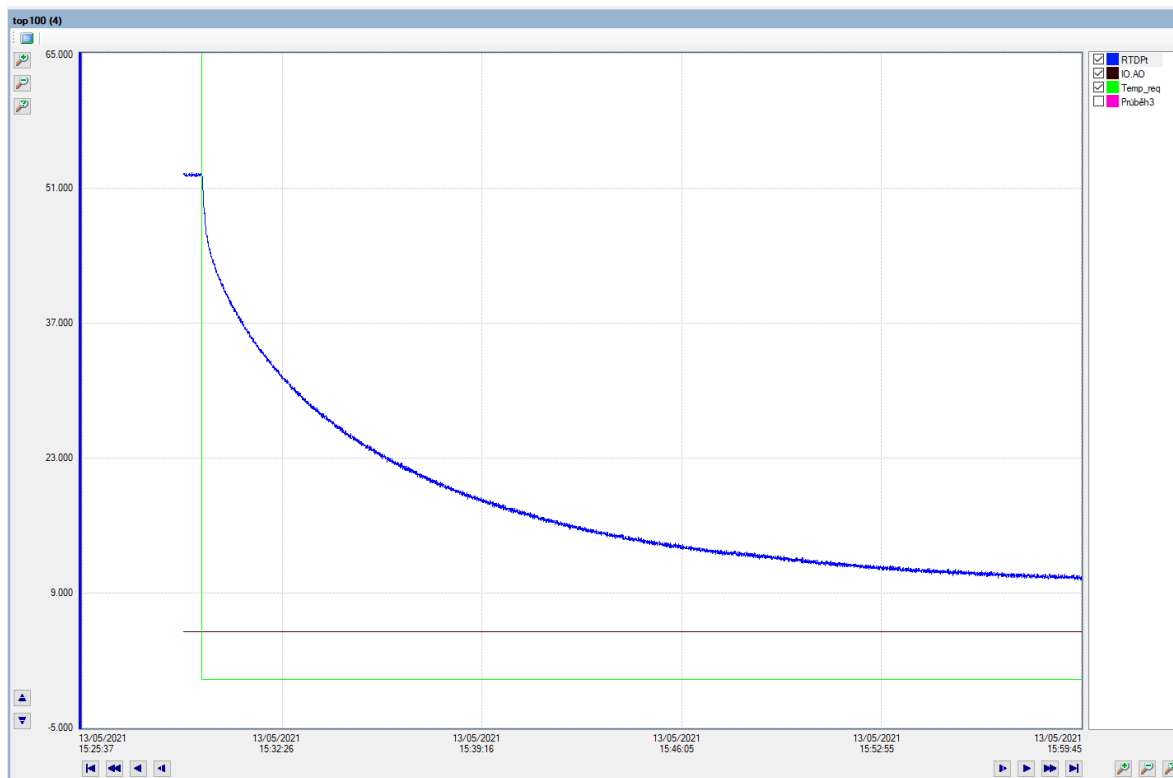
Po odfiltrování zprůměrováním a numerické derivaci dostaneme průběh na Obr. 51, tedy vývoj přírůstků v čase. Nárůst je tak rychlý a vzorkování příliš pomalé na to, abychom byli schopni zachytit počáteční pomalejší nárůst a inflexní bod (Obr. 3). Z toho lze bezpečně usuzovat, že tato soustava bude spadat do prvního řádku tabulky na Obr. 4, tedy že je dobře regulovatelná. To je zajisté dáno i umístěním čidla teploty, které dělí od akčního prvku pouze několik milimetrů hliníku.

Přírůstky



Obr. 51 Přírůstky ohřev

Stejně tak byla naměřena i křivka chlazení (Obr. 52).

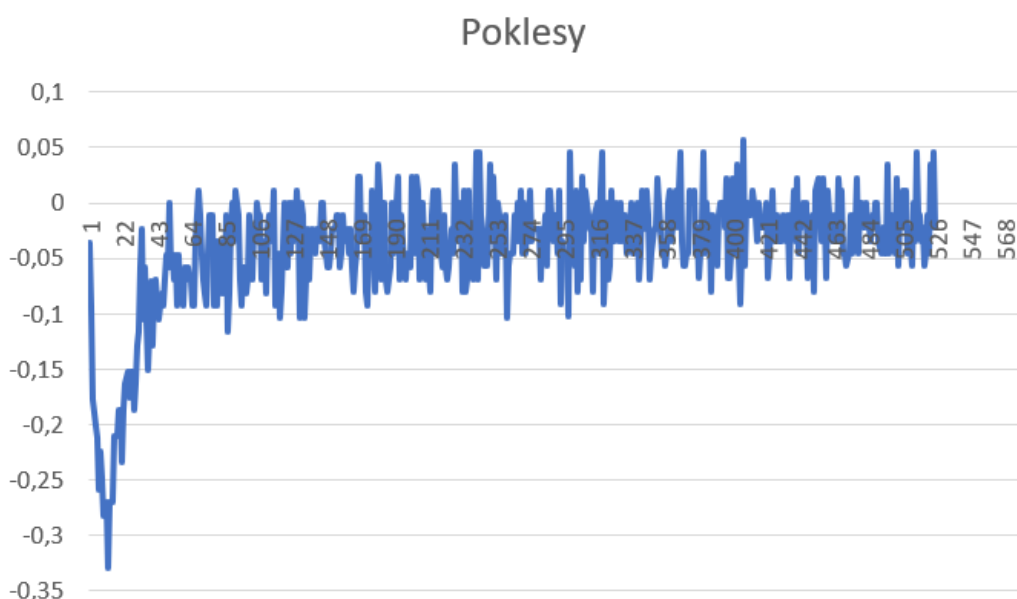


Obr. 52 Křivka chlazení 100

Chladnutí je děj o něco pomalejší, jelikož článek více tepla vydá na „teplé“ straně, než absorbuje na straně „chladné“. I díky tomu se nám podařilo zachytit minimum numericky derivovaného průběhu (Obr. 53). Toto minimum, tedy inflexní bod dvoukapacitního systému, byl vysledován 4 s od začátku chlazení, kdy teplota poklesne o 1,6 °C.

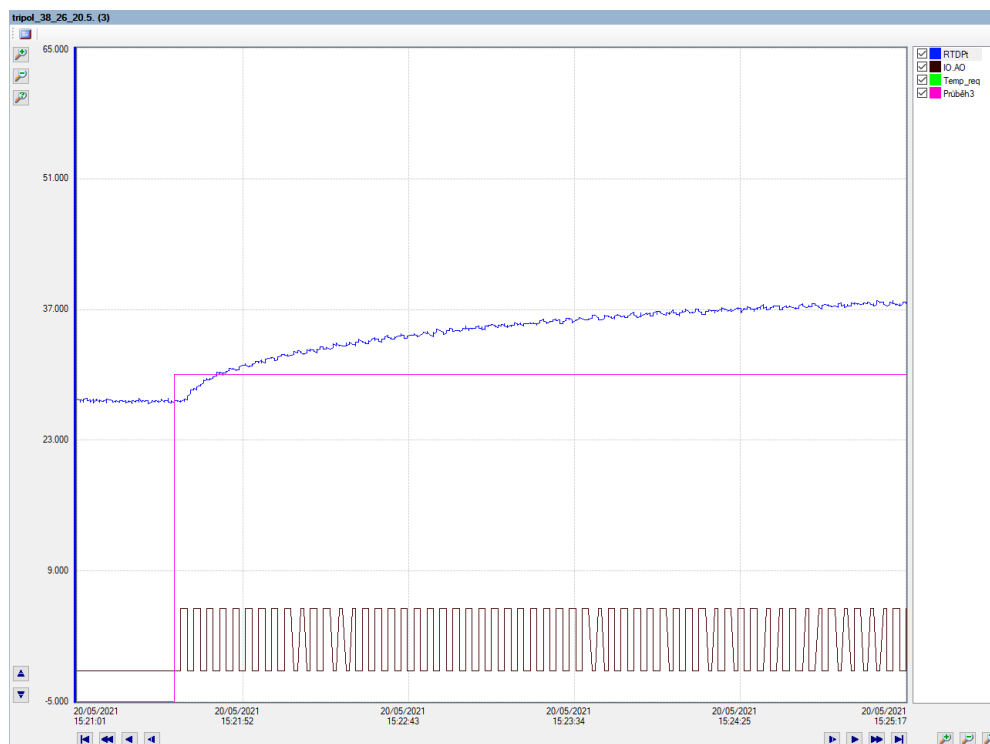
Se směrnicí poklesu -0,3 na časový úsek (250 ms) protněme přímkou proloženou inflexním bodem počáteční hodnotu za zhruba 5 úseků, tedy 1,25 s. Po odečtení od odečtených 4 s dostaneme odhad hodnoty doby průtahu $T_u = 2,75$ s. Na druhou stranu přímkou proloženou inflexním bodem protne hladinu určenou minimální teplotou (10,5 °C) za zhruba 130 úseků, tedy 33 s. Takže stále se pohybujeme dle tabulky na Obr. 4 v kategorii dobré regulovatelnosti.

Tyto výpočty jsou pouze orientační, jelikož naměřená data jsou zatížena nezanedbatelnou chybou. Poskytuje však odhad chování soustavy, které se dobrou regulovatelností dále potvrdí.



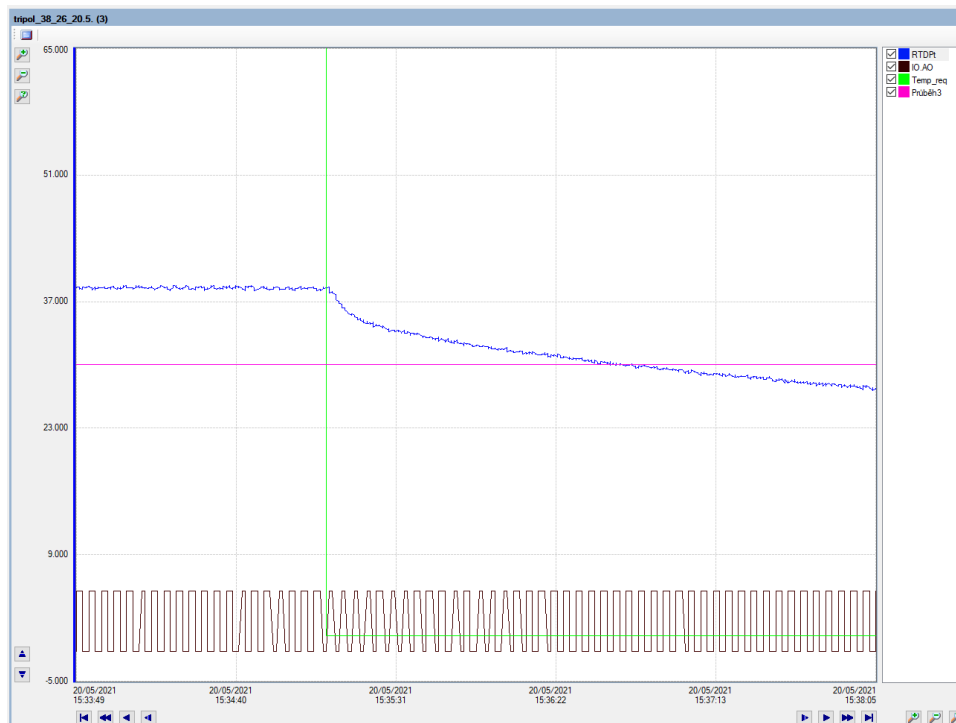
Obr. 53 Úbytky chlazení

Obdobně bychom mohli měřit křivky ohřevu a chladnutí pro libovolný akční zásah. Na Obr. 54 vidíme topení se střídou 50 %. Můžeme pozorovat, že teplota se ustálí oproti plnému zatížení zhruba o 13 °C níže.



Obr. 54 Křivka ohřevu 50

Stejně tak křivka chladnutí (Obr. 55) se ustálí na teplotě blíže teplotě místnosti oproti plné zátěži.



Obr. 55 Křivka chladnutí 50

6.4 Implementace dvoupolohového algoritmu

Na Obr. 56 vidíme část procesu, která vykonává dvoupolohovou regulaci. Tato regulace je nastavena jako výchozí při zapnutí regulátoru. Toto vidíme na Obr. 46, kde je jako inicializační hodnota nastavena nula.

Při výběru tohoto algoritmu je uživatelem nastavována pouze žádaná teplota *Temp_req* a velikost pásma necitlivosti *Hys*.

```
// Dvoupolohova
if Mode == 0 then
    //Definice jednoduchých pásem
    if IO.RTDpt < (Temp_req-Hys/2) then
        IO.A00 = 10;
        IO.D00 = true;
        IO.D01 = false;
        RS=0;
    endif;

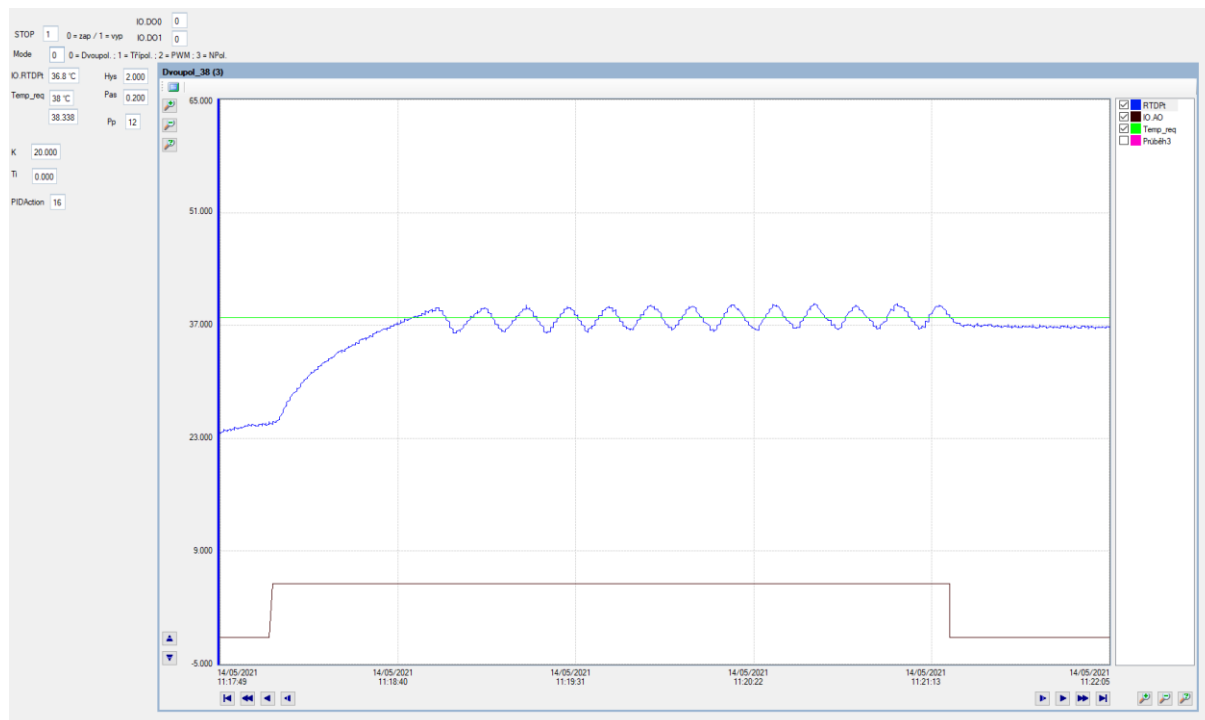
    if IO.RTDpt > (Temp_req+Hys/2) then
        IO.A00 = 10;
        IO.D00 = false;
        IO.D01 = true;
        RS=1;
    endif;

    //Logika v hysterezních pásmech
    if IO.RTDpt > (Temp_req-Hys/2) and RS==0 then
        IO.A00 = 10;
        IO.D00 = true;
        IO.D01 = false;
    endif;

    if IO.RTDpt < (Temp_req+Hys/2) and RS==1 then
        IO.A00 = 10;
        IO.D00 = false;
        IO.D01 = true;
    endif;
endif;
```

Obr. 56 Dvoupol. Implementace

Na Obr. 57 vidíme naměřená data zobrazená v programu ViewDet. Zde je možné nejen sledovat zvolené proměnné a jejich vývoj v čase, ale také si potřebná data vytáhnout k dalšímu zpracování ve formě .csv souboru.

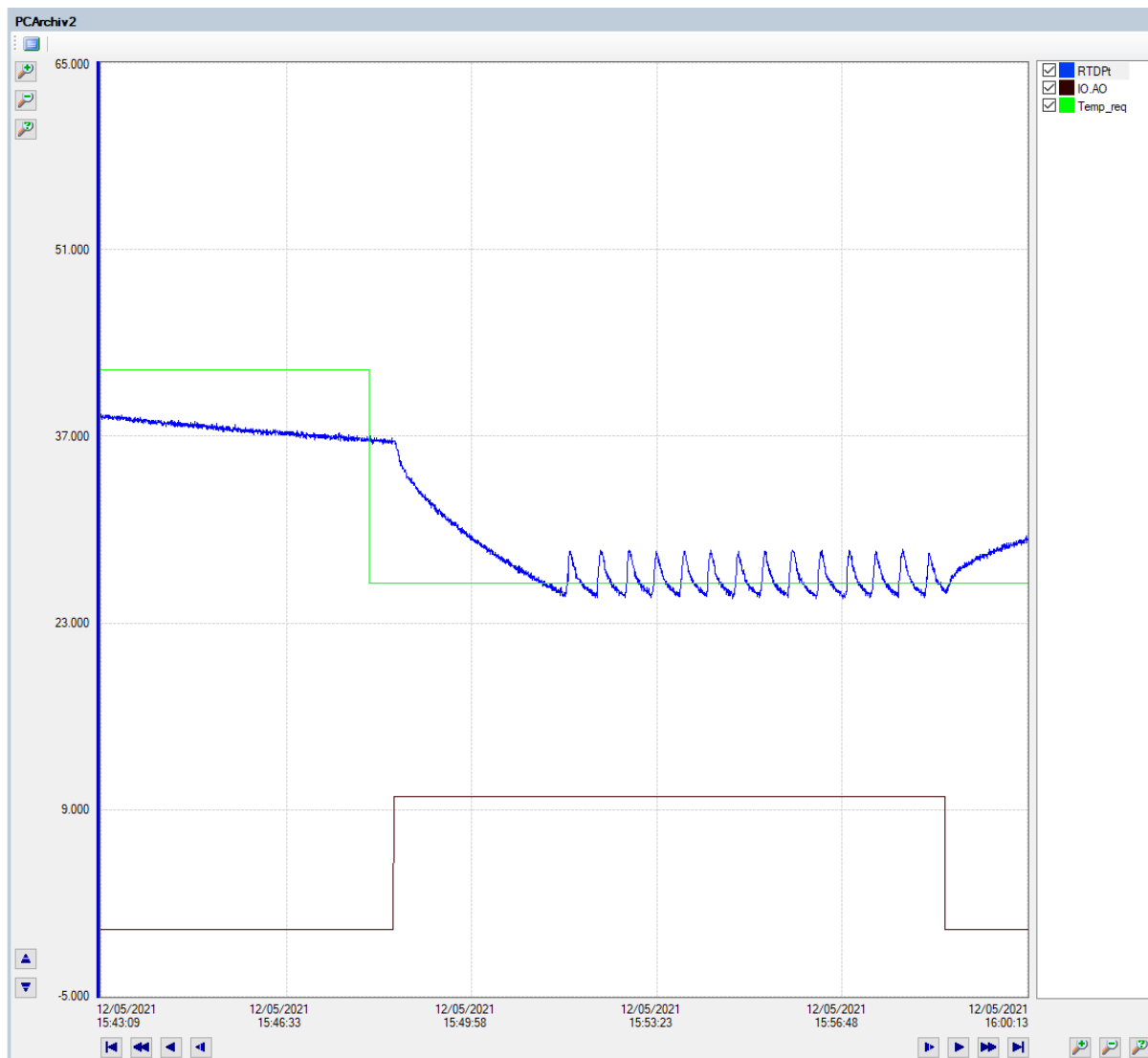


Obr. 57 Data dvoupol.38

Tab. 1 Dvoupol. 38 parametry

Max. překmit + [°C]	Max. překmit - [°C]	Průměrný překmit + [°C]	Průměrný překmit - [°C]	Čas [s]	Měrná spotřeba [%]
0,664	0,960	0,468	0,662	41	100

Pro všechny typy regulace byly vybrány dvě hodnoty jako referenční, a to regulace na teplotu *Temp_req* 38 °C a *Temp_req* 26 °C. Průběh teploty při chlazení na požadovanou teplotu 26 °C vidíme na Obr. 58.



Obr. 58 Data dvoupol. 26

Tab. 2 Dvoupol. 26 parametry

Max. překmit + [°C]	Max. překmit - [°C]	Průměrný překmit + [°C]	Průměrný překmit - [°C]	Čas [s]	Měrná spotřeba [%]
1,520	0,087	1,343	-0,033	166	100

6.5 Implementace třípolohového algoritmu

Jak vidíme na Obr. 59, byla zde implementována ochrana proti špatně zvoleným parametrům ve formě *while* cyklu na v prvním odstavci kódu. Ta zaručuje, že se jednotlivá hysterezní pásma nepřekrývají, i kdyby uživatel nešikovně zvolil tyto parametry. Polovina pásu musí být alespoň o 5 % větší než polovina hystereze. Samozřejmě, že by to samé šlo vyjádřit i bez polovin, tento zápis však reflektuje logiku použitou při návrhu, kdy nás zajímají právě poloviny od určité hodnoty, nikoliv celé šířky pásů.

V druhém odstavci jsou pak definována jednoduchá pásma, kde jsou přiřazeny hodnoty akčního zásahu a také hodnota pomocné proměnné *RS*.

```
//Tripolohova
if Mode == 1 then

    //Aut. úprava velikosti pásu
    While Pas/2 < (1.05 * Hys/2) DO
        Pas=Real_To_Int(Pas+0.02*Pas);
    endwhile;
    //Definice jednoduchých pásem
    if IO.RTDpt < (Temp_req-Pas-Hys/2) then
        PWM3IN = 100;
        IO.DO0 = true;
        IO.DO1 = false;
        RS=0;
    endif;
    if IO.RTDpt > (Temp_req-Pas+Hys/2) and IO.RTDpt < (Temp_req+Hys/2) then
        PWM3IN = 50;
        IO.DO0 = true;
        IO.DO1 = false;
        RS=1;
    endif;
    if IO.RTDpt > (Temp_req+Hys/2) then
        PWM3IN = 50;
        IO.DO0 = false;
        IO.DO1 = true;
        RS=2;
    endif;
endif;
```

Obr. 59 Třípol. definice jednoduchých pásem

V druhé části byly vyřešeny pásma hysterezní (Obr. 60). Stejně jako v pásmech jednoduchých je uživatelem nezměnitelně dáno, že chlazení probíhá pouze na 50 %, stejně jako topení v intervalu blízko žádané teploty *Temp_req*. Jak blízko intenzita topení přechází do méně výkonného intervalu je dáno uživateli přístupným parametrem *Pas*. Přístupný je z obrazovky nastavení.


```

//Logika v hysterezních pásmech
if IO.RTDpt > (Temp_req-Pas-Hys/2) and RS==0 then
    PWM3IN = 100;
    IO.D00 = true;
    IO.D01 = false;
endif;

if IO.RTDpt < (Temp_req-Pas+Hys/2) and RS==1 then
    PWM3IN = 50;
    IO.D00 = true;
    IO.D01 = false;
endif;

if IO.RTDpt > (Temp_req-Hys/2) and RS==1 then
    PWM3IN = 50;
    IO.D00 = true;
    IO.D01 = false;
endif;

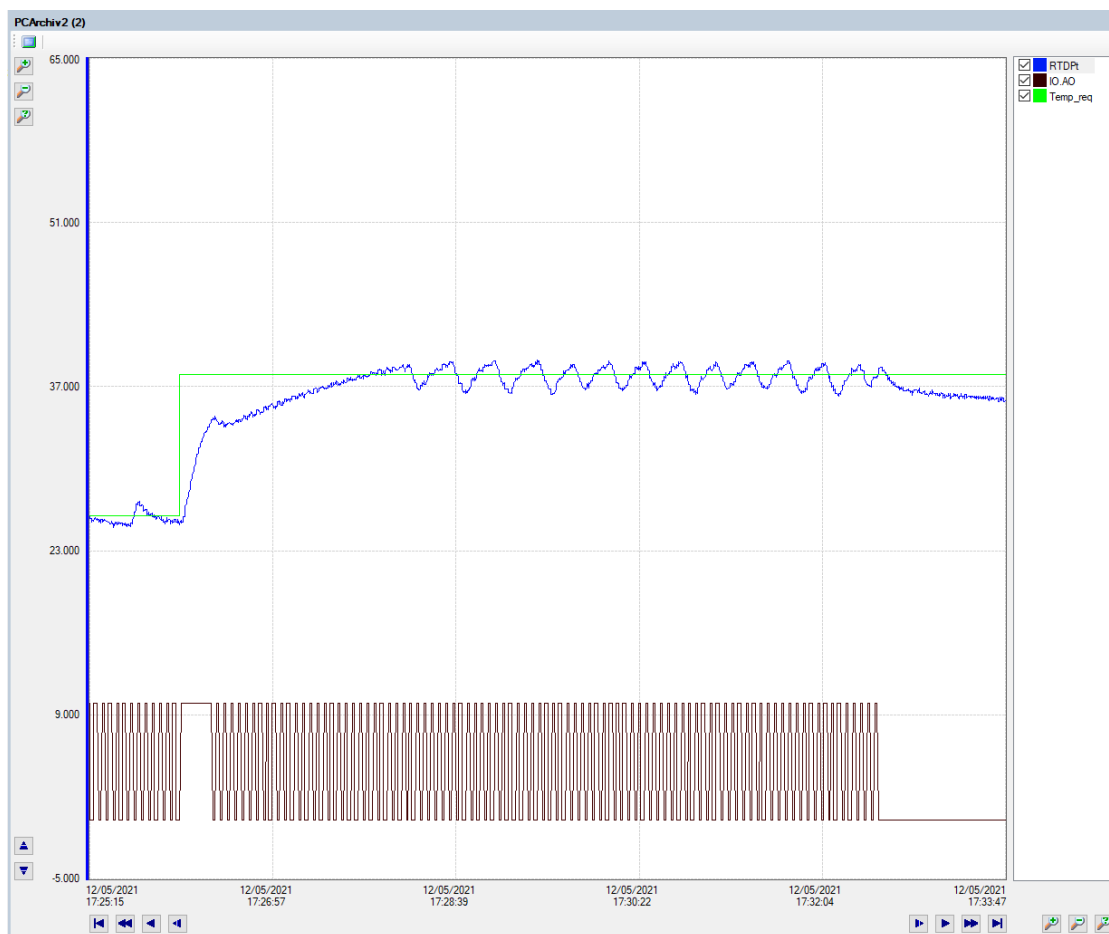
if IO.RTDpt < (Temp_req+Hys/2) and RS==2 then
    PWM3IN = 50;
    IO.D00 = false;
    IO.D01 = true;
endif;

//blok PWM
PWM3(Input = PWM3IN, Period = 1, Out => PWM3OUT.0);
IO.A00=PWM3OUT*10;
endif;

```

Obr. 60 Třípol. definice hysterezních pásem

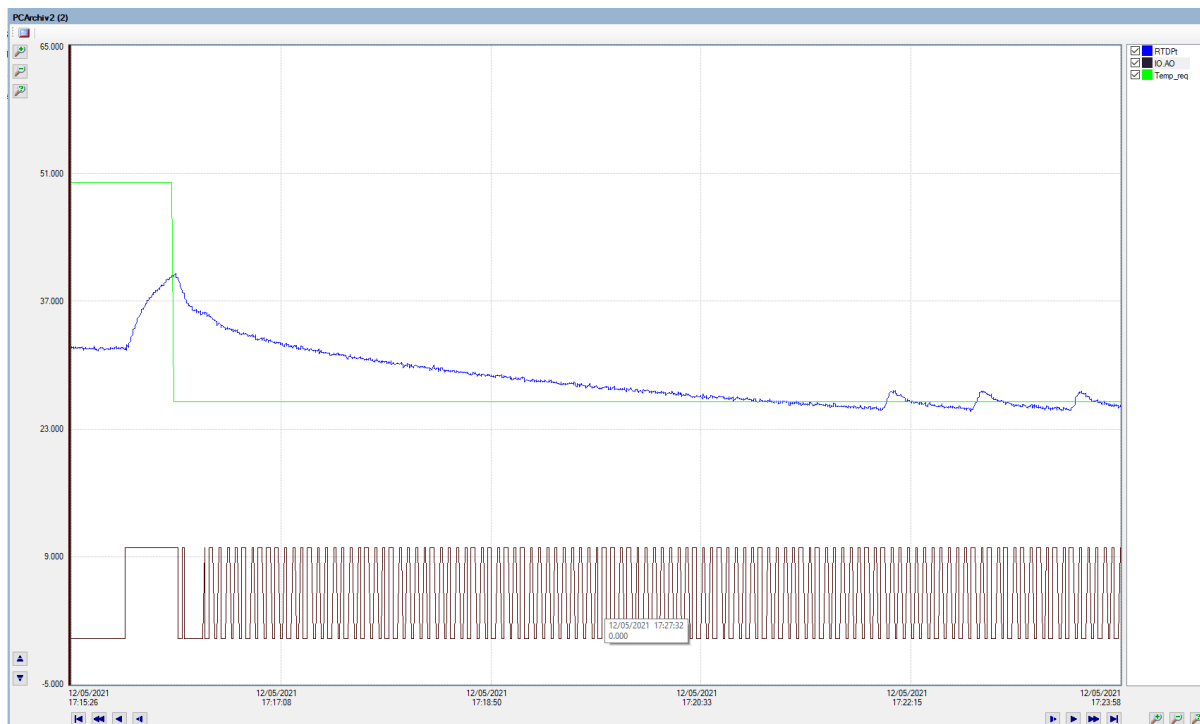
Na Obr. 61 vidíme průběh pro náběh při aktivním třípolohovém algoritmu. Jak vyplývá z kódu, ve chvíli, kdy se přiblíží měřená teplota žádané (ponížené o polovinu hystereze) blíže než na hodnotu Pas, sníží se výkon na 50 % pomocí zápisu této hodnoty jako střidy PWM. Simulujeme tak odpojení jednoho ze dvou topných článků. Zajímavá je oblast přechodu mezi těmito dvěma polohami, kdy dochází k lokálnímu poklesu měřené teploty. To je dáno náhlým vysokým poklesem dodávané energie, kdy se teplo rychle odvede žebry chladiče do ovzduší a chvíli trvá, než se průběh ustálí na nově nastavené křivce ohřevu, jejíž průběh odpovídá Obr. 54 v daném rozsahu teplot (při konstantní teplotě okolí).



Obr. 61 Třípol. 38

Tab. 3 Třípol. 38 parametry

Max. překmit + [°C]	Max. překmit - [°C]	Průměrný překmit + [°C]	Průměrný překmit - [°C]	Čas [s]	Měrná spotřeba [%]
0,260	0,846	0,145	0,416	107	57



Obr. 62 Třípol. 26

Tab. 4 Třípol. 26 parametry

Max. překmit + [°C]	Max. překmit - [°C]	Průměrný překmit + [°C]	Průměrný překmit - [°C]	Čas [s]	Měrná spotřeba [%]
1,180	0,087	0,880	0,057	287	49

6.6 Implementace kvazispojitého algoritmu s PWM

Na Obr. 63 vidíme kód kvazispojitého PWM algoritmu, kde je velikost třídy určena akčním zásahem z funkčního bloku PID. Blok je původně zamýšlen tak, že ve chvíli, kdy dostane hodnotu Msr větší než Set , nastaví akční zásah na nulu.

To je naprosto v pořádku v aplikacích, kde je možné a žádoucí pouze topit. V našem případě však bylo elegantní v jednom bloku ošetřit i možnost chlazení. Hodnoty, které blok považuje za měřenou a žádanou, proto byly ošetřeny podmínkou tak, aby se v případě, že je hodnota teploty měřené nad hodnotou teploty žádané, v logice bloku vyměnily, takže blok vyprodukuje adekvátní akční zásah i pro případ chlazení.

Podmínku zapsanou pomocí „?“ a „:“ lze přeložit tak, že část před „?“ vyjadřuje podmínku, která musí být splněna, aby byla za hodnotu proměnné považována první z dvojice proměnných oddělených „:“. V případě, že podmínka před „?“ splněna není, je za hodnotu parametru bloku považována druhá hodnota. Ve chvíli, kdy podmínka splněna není a hodnota měřená $IO.RTDpt$ je větší než hodnota měřená $Temp_req$, jsou proměnné přiřazeny tak, že $Temp_req$ je považována za měřenou a $IO.RTDpt$ za požadovanou, takže si blok myslí, že počítá zásah pro topení, přestože doopravdy spočítal zásah pro chlazení.

Jelikož algoritmus není schopen podle akčního zásahu rozeznat, jakým směrem se má vývoj k žádané teplotě ubírat, bylo třeba toto specifikovat pomocí porovnání měřené a žádané teploty a na tomto základě nastavení hodnot na výstupy *IO.DO0* a *IO.DO1*.

```
//PID
if Mode == 2 then

    Pid1(
        Set = (IO.RTDpt < Temp_req) ? Temp_req : IO.RTDpt,
        Msr = (IO.RTDpt < Temp_req) ? IO.RTDpt : Temp_req,
        K = Pid1.K,
        Ti = Pid1.Ti,
        Td = Pid1.Td,
        Lo = 0,
        Hi = 100,
        Bias = 0,
        DeadBand = Hys,
        DerivationDelay = Pid1.DerivationDelay,
        Action => PWM0IN
    );

    if IO.RTDpt < Temp_req-hys/2 then
        IO.DO0 = true;
        IO.DO1 = false;
    endif;

    if IO.RTDpt > Temp_req+hys/2 then
        IO.DO0 = false;
        IO.DO1 = true;
    endif;

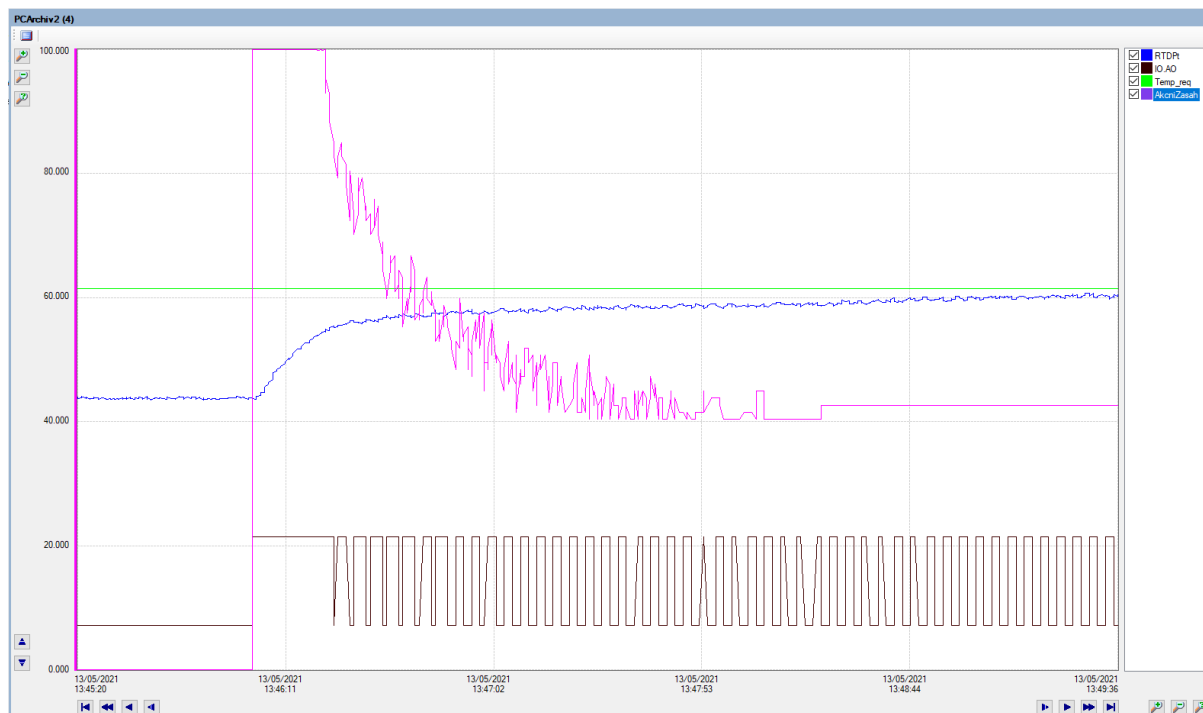
    PWM0(Input = PWM0IN, Period = 4, Out => PWM0OUT.0);
    IO.A00=PWM0OUT*10;

endif;
```

Obr. 63 Algoritmus s PWM

Po vzoru předchozích implementovaných algoritmů byl měřen náběh na referenční hodnotu 38 °C, průběh měřených veličin je k vidění na Obr. 64.

Na obou grafech (Obr. 64, Obr. 65) s průběhy důležitých veličin si můžeme povšimnout, že průběh pojmenovaný jako *AkcniZasah* (Obr. 64 a Obr. 65 růžovou barvou) se po určité době ustálí na jedné hodnotě. Toto je dáno parametrem *Hys*, který figuruje v bloku PID jako parametr určující velikost pásma necitlivosti. Jakmile měřená teplota pohybuje v tomto pásu, akční zásah se nepřepočítává a stává se konstantním. Tato funkce je v bloku implementována kvůli případu, kdy je akčním prvkem například ventil, který reguluje množství topné vody vpuštěné do oběhu. Bez této funkce by se ventil i v prakticky ustáleném stavu neustále vykonával mikro pohyby v souladu s malými změnami v akčním zásahu a tím se nadměrně opotřeboval bez vlivného pozitivního dopadu na regulaci.



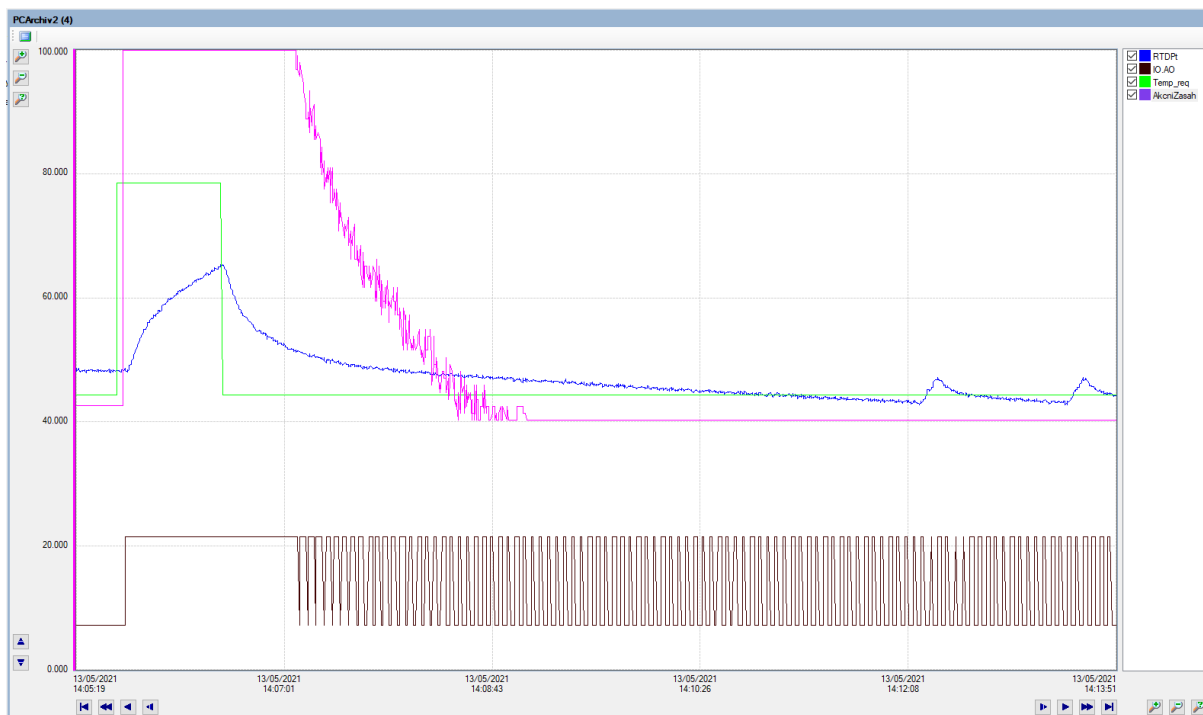
Obr. 64 PWM 38

Tab. 5 PWM 38 parametry

Max. překmit + [°C]	Max. překmit - [°C]	Průměrný překmit + [°C]	Průměrný překmit - [°C]	Čas [s]	Měrná spotřeba [%]
-0,489	-0,820	-	-	306	51

Záporné hodnoty v Tab. 5 překmitů značí, že hodnoty nejvzdálenější hodnotě požadované jsou bezpečně v našem vymezené jednostupňovém vymezeném pásu (37 °C až 39 °C) a za celou dobu, pomineme-li náběh, z tohoto povoleného pásu nevybočí.

Na Obr. 65 vidíme průběh regulované veličiny při ponechání univerzálních inicializačních parametrů $K = 20$, $Hys = 2$. Dle pravidel v kapitole 4.3 by bylo vhodné parametry uzpůsobit individuálně pro každou požadovanou teplotu v závislosti na tom, jakou chybou průběh trpí. V tomto případě by bylo vhodné snížit zesílení K a mírně i pásmo necitlivost Hys , regulace však stále nabývá přijatelných parametrů vzhledem k tomu, že k překmitu mimo povolené pásmo dochází jen krátce s periodou přibližně jednodominutovou.



Obr. 65 PWM 26

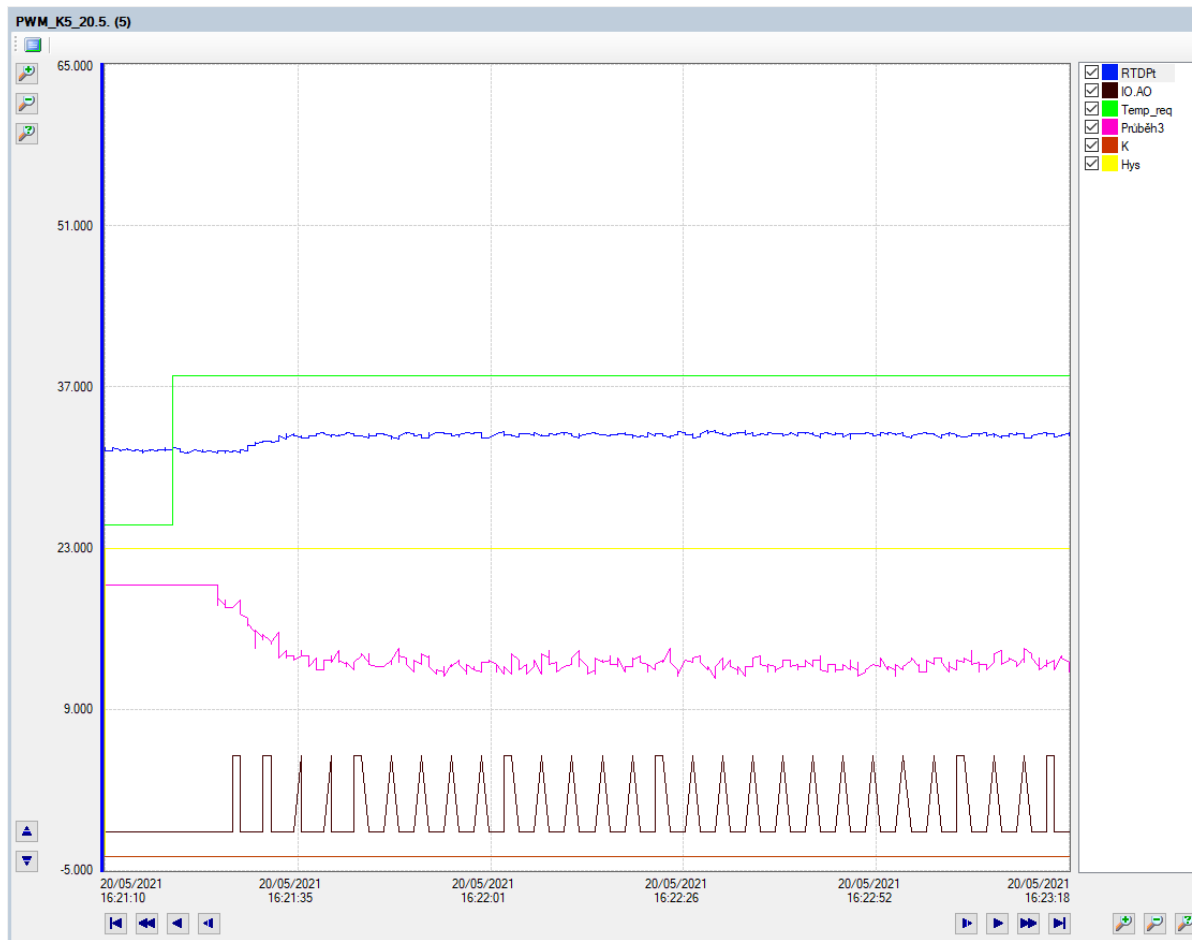
Tab. 6 PWM 26 parametry

Max. překmit + [°C]	Max. překmit - [°C]	Průměrný překmit + [°C]	Průměrný překmit - [°C]	Čas [s]	Měrná spotřeba [%]
0,955	0,031	0,880	-0,251	265	56

Záporná hodnota průměrného překmitu do mínusu je proto, že ViewDet zpracovává hodnoty s jinou periodou, než PLC vyčítá a vyhodnocuje vstupy. Přestože PLC muselo nižší teplotu načíst (jinak by nezměnilo stav a nezačalo topit), do ViewDetu se již tyto hodnoty velmi blízko 25 °C hranici většinou nepřepsaly. S jistotou však můžeme tvrdit, že překmit je opravdu velmi malý a následný ohřev se projeví velmi svižně.

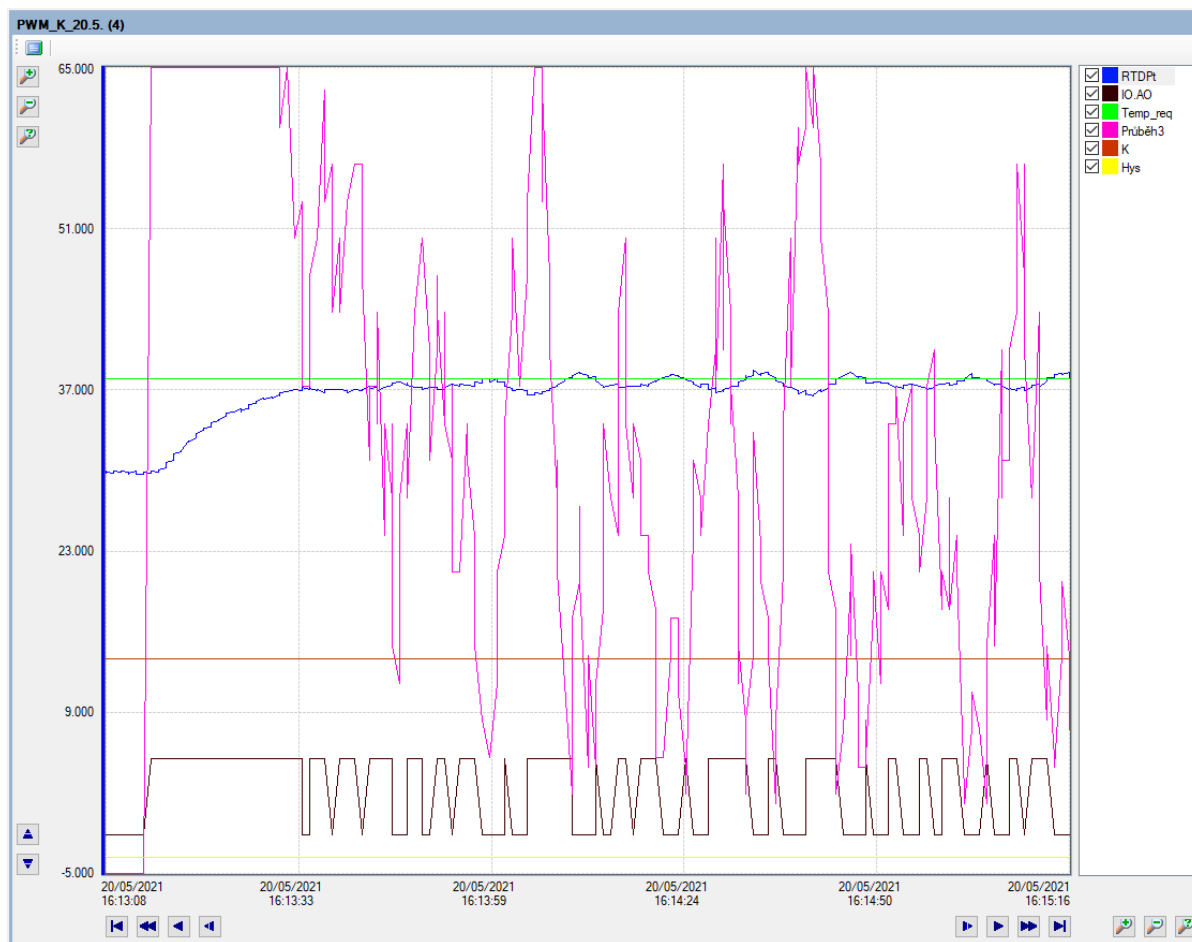
Jako univerzální inicializační hodnota zesílení P regulátoru byla nastavena hodnota $K = 20$ v kombinaci s pásmem necitlivosti $Hys = 2$.

Hodnota zesílení $K = 5$ (Obr. 66) byla vyhodnocena jako příliš malá, jelikož průběh nápadně připomíná vývoj na Obr. 15.



Obr. 66 PWM nízké zesílení

Hodnota zesílení $K = 80$ (Obr. 66) byla vyhodnocena jako příliš vysoká, jelikož nápadně připomíná nestabilní průběh regulované veličiny na Obr. 16. Můžeme pozorovat, že akční zásah (Průběh3 viz legenda Obr. 67) se vyvíjí značně chaoticky a neustálí se na žádné konkrétní hodnotě.



Obr. 67 PWM příliš vysoké zesílení

6.7 Implementace vlastního algoritmu

Vlastní algoritmus byl navrhnout pro situaci, že máme N topných/chladících prvků. To nám dává možnost spínat pouze některé z nich podle potřeby. Zde byla podobně jako u algoritmu třípolohového přítomnost více článků simulována pevně určenou šířkovou modulací na základě počtu topných/chladících těles. Počet zadává uživatel na obrazovce nastavení parametrem N .


```

//N-polohova
if Mode==3 then
//Rozdeleni na jednoduchá pásma a topení
    N = (Pp-2)/2;
    if IO.RTDpt < (Temp_req-Hys/2) then
        for i = 1 to N do
            if IO.RTDpt < (Temp_req-hys/2-(i-1)*pas) then
                PWMNIN = Real_To_Int(100*i/N);
            endif;
        endfor;
        IO.D00 = true;
        IO.D01 = false;
        RS=0;
    endif;
//Rozdeleni na jednoduchá pásma a chlazení
    if IO.RTDpt > (Temp_req+Hys/2) then
        for i=1 to N do
            if IO.RTDpt > (Temp_req+hys/2+(i-1)*pas) then
                PWMNIN = Real_To_Int(100*i/N);
            endif;
        endfor;
        IO.D00 = false;
        IO.D01 = true;
        RS=1;
    endif;

```

Obr. 68 Npol. definice jednoduchých pásem

Dále je třeba definovat pásmo hysterezní tak, aby nedocházelo k příliš častému spínání v případě, že měřená teplota osciluje okolo hladiny teploty žádané. Toto obdobně jako u ostatních algoritmů zajišťuje pomocná proměnná RS.

```

//Definice hysterezního pásma
if IO.RTDpt > (Temp_req-Hys/2) and RS==0 then
    PWMNIN = dint_to_int(100/(n+1));
    IO.D00 = true;
    IO.D01 = false;
endif;

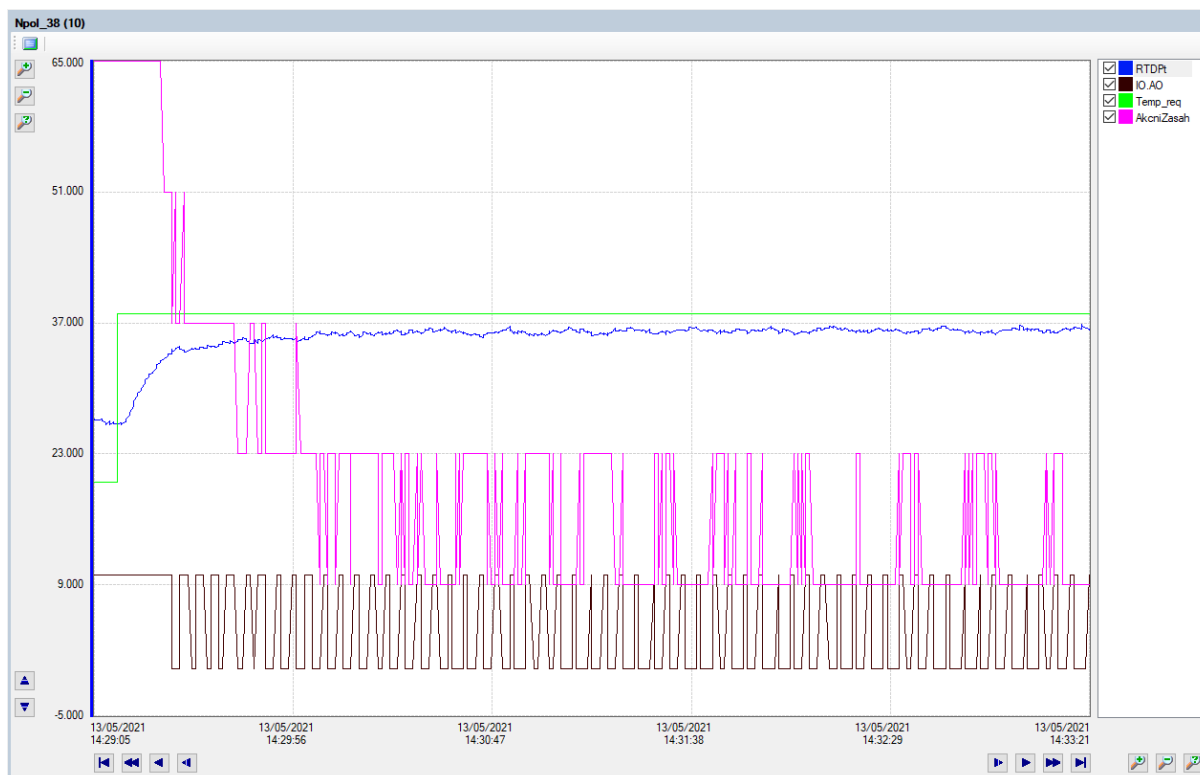
if IO.RTDpt < (Temp_req+Hys/2) and RS==1 then
    PWMNIN = DInt_To_Int(100/(n+1));
    IO.D00 = false;
    IO.D01 = true;
endif;

//Simulace pomocí PWM
PWM1(Input= PWMNIN ,Period= 4 ,Out=> PWMNOUT.0 );
IO.A00=PWMNOUT*10;
endif;

```

Obr. 69 Npol. definice hysterezního pásma

Na Obr. 70 vidíme takovýto průběh pro 12ti polohovou regulaci, tedy 6 separátne ovládaných topných těles a 6 chladicích, případně 6 regulačních prvků, co zvládají obě funkce, jako právě zde instalovaný Peltierův článek.



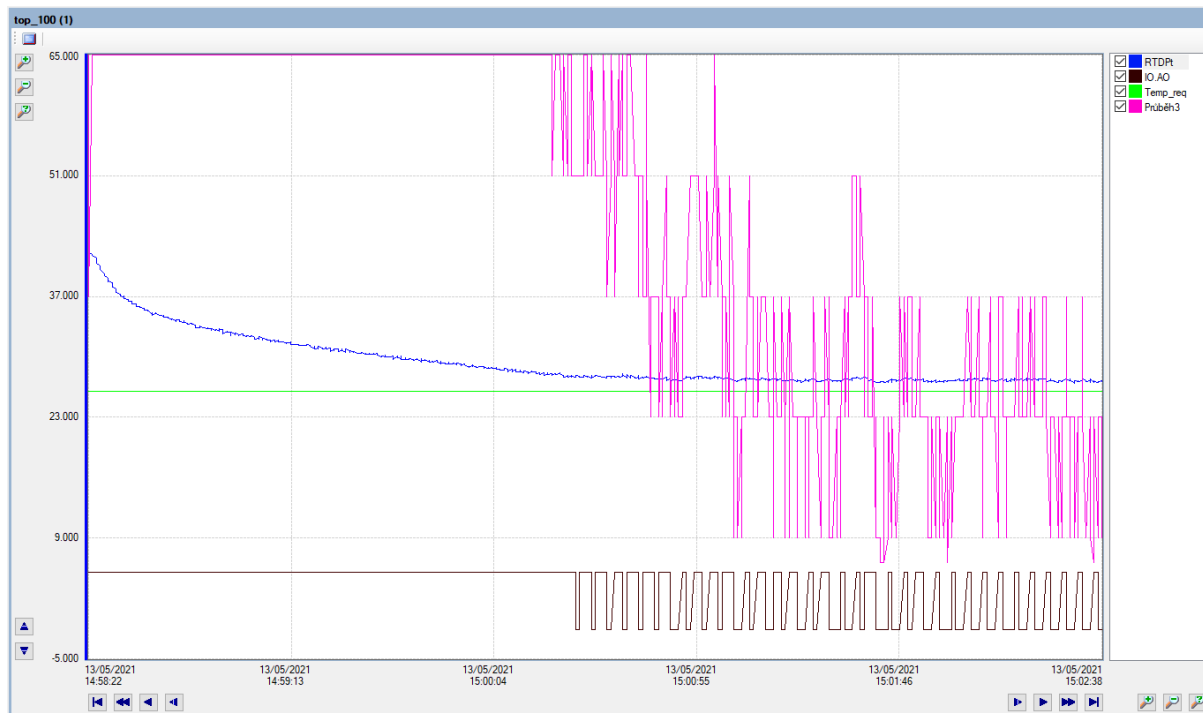
Obr. 70 Npol. 38

Tab. 7: Npol. 38 parametry

Max. překmit + [°C]	Max. překmit - [°C]	Průměrný překmit + [°C]	Průměrný překmit - [°C]	Čas [s]	Měrná spotřeba [%]
-	0,56	-	-	209	43

S tímto základním nastavením parametrů nebylo povolené jednostupňové pásmo do plusu překročeno. Takto nastavené parametry trpí podobnou chybou, jako při použití P regulátoru s nízkým zesílením (Obr. 15). Je-li takovýto průběh pozorován, pomůže sdružení akčních prvků (snížení počtu poloh) a zmenšení proměnné Pas tak, aby se začalo dělení výkonu dít blíže žádané teplotě.

Stejně jako u algoritmů předchozích bylo měřeno i chlazení na teplotu 26 °C (Obr. 71). Inicializační nastavené parametry jsou pro tuto teplotu vhodně nastaveny z hlediska překmitů, které jsou relativně nízké. Cenou za to je nejdelší čas náběhu ze všech prezentovaných měřených průběhů (389 s).



Obr. 71 Npol. 26

Tab. 8 Npol. 26 parametry

Max. překmit + [°C]	Max. překmit - [°C]	Průměrný překmit + [°C]	Průměrný překmit - [°C]	Čas [s]	Měrná spotřeba [%]
0,560	0,031	0,202	0,025	389	51

7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Jak vyplývá z tabulek Tab. 1 až Tab. 8, výsledky se pro jednotlivé algoritmy poměrně výrazně liší. Metrika pro zjištění výsledných parametrů regulace byla taková, že při žádané teplotě 38 °C jsme pokaždé vycházeli z počáteční teploty 26 °C s tolerancí jednoho stupně. Při žádané teplotě 26 °C byla teplota na začátku měření 40 °C s tolerancí jednoho a půl stupně. Hodnoty překmitů nebyly určeny od žádané teploty, ale od žádané teploty s ohledem na hysterezi, v našem případě dvoustupňový pás necitlivosti (jeden stupeň nad a jeden stupeň pod žádanou hodnotu). Čas byl určen od začátku měření do chvíle, kdy měřená teplota dosáhla žádané teploty s tolerancí desetiny stupně, po odfiltrování nahodilých výkyvů. Spotřeba byla počítána od začátku měření do doby náběhu, a to poměrem stavů zapnuto ke všem naměřeným stavům. Průběhy byly naměřeny v rozmezí několika dní, kdy se teplota místnosti měnila. Tento faktor byl zanedbán, jelikož vycházíme z předpokladu, že tento rozdíl neměl příliš velký vliv na měřené průběhy.

Nejrychlejším náběhem na požadovanou teplotu disponuje regulace dvoupolohová. Zároveň je energeticky nejnáročnější, jelikož akční prvek odebírá proud nepřetržitě v celém časovém úseku. To, že se výkon nijak nestupňuje, se také projevuje nejvyššími překmity ze všech implementovaných algoritmů. V praxi je vhodné uzpůsobit výkon akčního prvku předpokládané žádané teplotě.

Tyto překmity se podařilo snížit implementací algoritmu třípolohového, však za cenu delších náběžných časů. Z provedení implementovaného algoritmu je zřejmé, že spotřeba energie by se dlouhodobě ustálila na 50 procentech oproti nepřetržitému odběru. Při náběhu je to však o několik procentních bodů více, jelikož je po určitou dobu aktivní plná zátěž. Tento úsek, kde topíme plnou zátěží, však pomůže regulaci z hlediska doby náběhu.

Kvazispojitý algoritmus s PWM, kde střidu určuje P regulátor, se ukázal jako použitelný se zajímavými hodnotami překmitů. Při náběhu na teplotu 38 °C jsme v průběhu měření dokonce ani nevystoupili z povoleného pásu. Díky pásmu necitlivosti v bloku PID se akční zásah ustálil na určité hodnotě, která v kombinaci s ideálně zvoleným zesílením $K = 20$ zaručila hladký náběh a udržení v pásmu bez překmitů.

Algoritmus vlastní, kde si uživatel může zvolit počet poloh, tedy simuluje počet spínaných topných/chladicích těles, nepřinesl z hlediska regulace tohoto modelu žádnou výhodu oproti algoritmu s PWM. Pro každou změnu požadované teploty musí uživatel odladit hodnoty hystereze a pásu tak, aby se na požadovanou hodnotu vůbec dostal. Z hlediska praxe však význam má, jelikož v aplikaci, kde je reálně instalovaný určitý počet článků, může uživatel odstupňovat spínání článků tak, že na požadovanou teplotu naběhne rychle a ve vymezeném intervalu regulovanou teplotu drží spínáním pouze některých článků. Původní předpoklad byl, že čím více poloh uživatel nastaví, tím lepší regulační parametry bude algoritmus vykazovat. Předpoklad byl vyvrácen měřením, jelikož při příliš velkém počtu poloh začne výkon klesat spínáním menšího počtu výstupů příliš brzo před dosažením požadované teploty a tento příliš malý počet sepnutých článků není schopen dodat systému dostatečnou energii pro dosažení žádané teploty. Počtu poloh se musí uzpůsobovat pás a hystereze do té míry, že bude často výhodnější ušetřit digitální výstupy řídicího systému a sdružit několik topných/chladicích těles na jedno relé.

8 ZÁVĚR

Vytvoření funkčního zařízení byl poměrně náročný úkol, jelikož na začátku návrhu bylo velmi málo známých. Podohodě s vedoucím práce bylo jasné, že akčním prvkem bude Peltierův článek, přičemž pro využití jeho topného i chladicího potenciálu bude vhodné použít součástku známou pod názvem H-můstek. Bylo třeba vybrat vhodný Peltierův článek a H-můstek, který je schopen spínat dostatečně velký proud. Po nastudování funkce H-můstku a požadavků na jeho ovládání bylo jasné, že řídicí systém musí disponovat alespoň třemi výstupy. Zpětnou vazbu zprostředkovává teplotní senzor, který musí do systému vstupovat analogově. Dále byl zřejmý požadavek na zásah do systému pomocí uživatelského rozhraní, jelikož ze zadání vyplývá, že bude třeba mezi implementovanými algoritmy přepínat a měnit jejich parametry. Toto by šlo ošetřit prvky jako tlačítka, přepínači a točítka, které by vyžadovaly několik digitálních či analogových vstupů navíc. Jako mnohem výhodnější a pružnější se ukázal výběr PLC se zabudovaným displejem, skrze jehož rozhraní má uživatel přístup k proměnným, které jsou navázány na parametry regulačních algoritmů.

Nelehkým úkolem byl návrh meziobvodu tak, aby byly výstupní elektrické parametry z PLC a zdrojů převedeny na hodnoty vhodné pro ovládání akčních prvků, tedy subsystému H-můstku s Peltierovým článkem a subsystému MOSFET modulu s ventilátorem. Toho bylo dosaženo pomocí konstrukce napěťového děliče.

Práce ukazuje, jak vybrat komponenty pro systém pro ovládání Peltierova článku a navrhnout mezivrstvy tak, aby byl celek funkční. Poskytuje příklad, jak lze implementaci vybraných algoritmů softwarově ošetřit s ohledem na vybraný akční prvek. Dále jak ze systému vytáhnout data do PC, kde jsou dále zpracovatelná.

Doporučení pro praxi, které z poznatků minulých kapitol plyne je, že je důležité, aby při snižování výkonu/odstavování akčních prvků byl stále akční zásah dostatečný na to, aby bylo dosaženo požadované teploty. Ideálně pokusem na konkrétním systému s tím, že je vhodné nechat jistou rezervu pro výkyvy prostředí. V tomto ohledu se osvědčil algoritmus s P regulátorem a PWM. Toto řešení však s sebou nese požadavky na vyšší úroveň řízení a softwarovou implementaci.

Cílů bylo dosaženo a předpokládá se, že model poslouží ÚVSSR při výuce automatizace.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BALÁTEĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0148-9.
- [2] OLEHLA, Miroslav, Slavomír NĚMEČEK a Ivan ŠVARC. *Automatické řízení*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. ISBN 978-80-7372-732-1.
- [3] VALTER, Jaroslav. Spojitý versus nespojitý regulátor. Regulace od Jardy [online]. Jindřichův Hradec: Jaroslav Valter, 2000, 12/08/2014 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://valter.byl.cz/spojity-versus-nespojity-regulator>
- [4] LINDA, Miloslav. Dvou a třípolohová regulace: Presentation presented at: [Automatické řízení technologických procesů, TF ČZU; 2021; Praha, Czechia.]
- [5] PWM signál a práce s ním. *Domat Control System s.r.o.* [online]. Pardubice: Domat Control System [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.domat-int.com/cs/pwm-signal-a-prace-s-nim>
- [6] ŠVARC, Ivan. *Automatické řízení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [7] A Brief History of Programmable Logic Controllers (PLCs). *Process Solutions: Control System Design & Integration* [online]. Stanwood, WA: Process Solutions, 19/05/2020 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.processsolutions.com/a-brief-history-of-programmable-logic-controllers-plcs/>
- [8] *AMiT Automation* [online]. Praha: AMiT Automation, 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://amitautomation.cz>
- [9] LYDON, Bill. Programming standards improve automation and controls. *International Society of Automation* [online]. Research Triangle Park, NC: International Society of Automation [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.isa.org/intech-home/2016/september-october/features/programming-standards-improve-automation-controls>
- [10] TwinCAT 3 | PLC. *Beckhoff Information System: New Automation Technology* [online]. Verl, DE: Beckhoff, 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tc3_plc_intro/2529388939.html&id=
- [11] PRATT, Gary L. Which IEC 61131-3 Programming Language is best? Part 2. *Control Engineering* [online]. Downers Grove, IL: CFE Media and Technology, 2021, 30/07/2020 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.controleng.com/articles/which-iec-61131-3-programming-language-is-best-part-2/>
- [12] Schematic depictions of thermoelectric effects. *ResearchGate* [online]. Boston: ResearchGate, 2008, 10/2015 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-depictions-of-thermoelectric-effects-a-The-more-energetic-electrons-at-the_fig5_283974782

- [13] Peltierův článek 55W 40x40mm TEC1-127060S. *GM electronic, spol. s r. o.* [online]. Praha: Web Revolution, 1990 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: <https://www.gme.cz/peltieruv-clanek-tec1-12706-vigan>
- [14] H-můstek BTS7960B pro stejnosměrné motory. *HADEX, spol. s r. o.* [online]. Ostrava: Softima, 2011 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: <https://hadex.cz/m536-h-mustek-bts7960b-pro-stejnosmerne-motory/>
- [15] PT100 platinum resistance thermometers. *Pico Technology* [online]. England, Wales: Pico Technology [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: <https://www.picotech.com/library/application-note/pt100-platinum-resistance-thermometers>
- [16] Data Acquisition System and Solutions [online]. Slovenia: Dewesoft, 2000 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://dewesoft.com>
- [17] HADEX, spol. s r. o. [online]. Ostrava: Softima, 2011 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: <https://hadex.cz>
- [18] PLEXISKLO - Polymethylmetakrylát (PMMA) - technické aspekty. *Plexisklo a plasty* [online]. Jedovnice: KOPLAST, 2008 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>
- [19] Seebeck effect. *Electronnoobs: DIY projects and tutorials* [online]. University of Barcelona, Spain: xwebing.com, 20/09/2020 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: <https://electronoobs.io/tutorial/188#>
- [20] Rychlá komunikace mezi automatizačními zařízeními a zařízeními pro procesní instrumentaci: Modbus. *WAGO* [online]. Praha: WAGO, 01/09/2020 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: <https://www.wago.com/cz/modbus>
- [21] Modbus 101 - Introduction to Modbus. *Control Solutions, Inc., Minnesota* [online]. Minnesota: Control Solutions, 2020 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: https://www.csimn.com/CSI_pages/Modbus101.html
- [22] Modbus Application Protocol Specification V1.1b. *The Modbus Organization* [online]. Hopkinton, MA: Modbus Organization, 2005, 28/12/2006 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf
- [23] Protokolu Modbus RTU v kostce (s podrobnými popisy a příklady). *Průmyslové počítače pro jakýkoli úkol* [online]. Praha: IPC2U s.r.o, 2019 [cit. 2021-5-19].
Dostupné z: <https://ipc2u.cz/articles/simple-decisions/protokolu-modbus-rtu-v-kostce>
- [24] DEJAN. L298N Motor Driver – Arduino Interface, How It Works, Codes, Schematics. *How To Mechatronics* [online]. 2019 [cit. 2021-5-21].
Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-dc-motor-control-tutorial-l298n-pwm-h-bridge/>
- [25] ŠVARC, Ivan. Automatické řízení. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978- 80-214-4398-3.
- [26] VÍTEČKOVÁ, Miluše. Základy automatické regulace. Přepřac. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1924-2

- [27] What Are The Seebeck Effect And The Peltier Effect? *Science ABC* [online].
Mumbai, India, 2021, 20.1.2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z:
<https://www.scienceabc.com/pure-sciences/what-are-the-seebeck-effect-and-peltier-effect.html>

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam tabulek

Tab. 1 Dvoupol. 38 parametry	54
Tab. 2 Dvoupol. 26 parametry	55
Tab. 3 Třípol. 38 parametry	58
Tab. 4 Třípol. 26 parametry	59
Tab. 5 PWM parametry	61
Tab. 6 PWM 26 parametry	62
Tab. 7: Npol. 38 parametry	66
Tab. 8 Npol. 26 parametry	67

10.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Proporcionální bezkapacitní soustava, a) příklad soustavy, b) přechodová charakteristika [2]	17
Obr. 2 Jednkapacitní proporcionální soustava, a) příklad soustavy, b) přechodová charakteristika [2]	18
Obr. 3 Dvoukapacitní proporcionální soustava, a) příklad soustavy, b) přechodová charakteristika [2]	19
Obr. 4 Tabulka regulovatelnosti soustavy [2]	19
Obr. 5 Schéma diskretního obvodu [2]	21
Obr. 6 Diskretní funkce [vlastní tvorba]	21
Obr. 7 Přehled standardních datových typů [9]	24
Obr. 8 Topologie RS485 [8]	25
Obr. 9 Komunikace po RS485 [8]	25
Obr. 10 Napětí na zahříváném vodiči [12]	26
Obr. 11 Napětí ve vodičích [12]	27
Obr. 12 Seebeckův efekt [12]	27
Obr. 13 Peltierův efekt [12]	27
Obr. 14 H-můstek [24]	28
Obr. 15 Nepříjemně nízké zesílení [8]	29
Obr. 16 Příliš vysoké zesílení	29
Obr. 17 Odporové křivky Pt	30
Obr. 18 Pt čidlo [16, upraveno]	30
Obr. 19 Článek TEC-12706 [17]	31
Obr. 20 H-můstek BTS7960B	31
Obr. 21 Tabulka signálů [17]	32
Obr. 22 Srovnání PLC	33
Obr. 23 AMR-CU70B [8]	33
Obr. 24 Držák [vlastní návrh]	34
Obr. 25 PrusaSlic	34
Obr. 26 Čidla Pt 1000 [17]	35

Obr. 27 Síťový adaptér 24 V [17]	35
Obr. 28 WX-DC2412 [17]	36
Obr. 29 AI ZH2533 [vlastní model]	36
Obr. 30 Obrobené chladiče [vlastní návrh]	37
Obr. 31 Chladič čelo [vlastní návrh]	37
Obr. 32 Chladič izolace [vlastní návrh]	38
Obr. 33 Ventilátory [17]	38
Obr. 34 MOSFET IRF520 [17]	39
Obr. 35 Deska napěťového děliče [17]	39
Obr. 36 Dělič schéma [vlastní návrh]	40
Obr. 37 Step-down měnič [17]	41
Obr. 38 Panel [vlastní foto]	42
Obr. 39 Schéma zapojení [vlastní návrh]	42
Obr. 40 Reálné zapojení [vlastní foto]	43
Obr. 41 DetStudio	44
Obr. 42 ViewDet	45
Obr. 43 Hlavní obrazovka	45
Obr. 44 Obrazovka nastavení	46
Obr. 45 Rozlišení pásem	46
Obr. 46 Popis proměnných, proměnné byly vytvořeny jako globální	47
Obr. 47 Burn ochrana	47
Obr. 48 Stop akce	47
Obr. 49 Vývojový diagram	48
Obr. 50 Křivka ohřevu 100	49
Obr. 51 Přírůstky ohřev	50
Obr. 52 Křivka chladnutí 100	50
Obr. 53 Úbytky chlazení	51
Obr. 54 Křivka ohřevu 50	52
Obr. 55 Křivka chladnutí 50	52
Obr. 56 Dvoupol. Implementace	53
Obr. 57 Data dvoupol.38	54
Obr. 58 Data dvoupol. 26	55
Obr. 59 Třípol. definice jednoduchých pásem	56
Obr. 60 Třípol. definice hysterezních pásem	57
Obr. 61 Třípol. 38	58
Obr. 62 Třípol. 26	59
Obr. 63 Algoritmus s PWM	60
Obr. 64 PWM 38	61
Obr. 65 PWM 26	62
Obr. 66 PWM nízké zesílení	63
Obr. 67 PWM příliš vysoké zesílení	64
Obr. 68 Npol. definice jednoduchých pásem	65
Obr. 69 Npol. definice hysterezního pásma	65
Obr. 70 Npol. 38	66
Obr. 71 Npol. 26	67

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: DP_DS.dsox (DetStudio projekt)

Příloha 2: DP_VD.mdb (ViewDet projekt)

Příloha 3: SCHÉMA ZAPOJENÍ MODELU.svg (Vektorová grafika)

Příloha 4: SCHÉMA NAPĚŤOVÉHO DĚLIČE.svg (Vektorová grafika)

Příloha 5: DRŽÁK_H.stl(3D objekt)

Příloha 6: DRŽÁK_S.stl (3D objekt)

Příloha 7: CHLADIČ.stl (3D objekt)